



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN ANALISIS MOTOR AXIAL FLUX
BRUSHLESS DC BERBASIS 3D FINITE ELEMENT
METHOD UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK**

Gede Bayu Anugrah Janardana
NRP 2211 100 183

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Prof.Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***DESIGN AND ANALYSIS AXIAL FLUX BRUSHLESS DC
MOTOR BASED 3D FINITE ELEMENT METHOD FOR
ELECTRIC VEHICLE APLICATION***

Gede Bayu Anugrah Janardana
NRP 2211100183

Advisor
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Prof.Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

**DESAIN DAN ANALISIS MOTOR AXIAL FLUX BRUSHLESS DC
BERBASIS 3D FINITE ELEMENT METHOD UNTUK APLIKASI
KENDARAAN LISTRIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Dosen Pembimbing II,

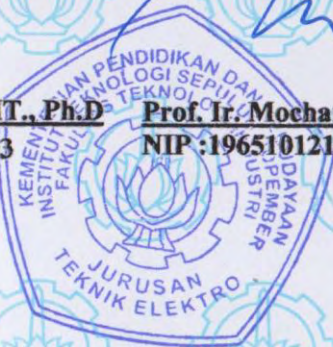


Hari Suryatomojo, ST., MT., Ph.D

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

NIP : 198006032006041003

NIP : 196510121990031003



**SURABAYA
JANUARI, 2015**

DESAIN DAN ANALISIS MOTOR *AXIAL FLUX BRUSHLESS DC* BERBASIS *3D FINITE ELEMENT METHOD* UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK

Nama : Gede Bayu Anugrah Janardana
Pembimbing I : Heri Suryoatmjo, ST., MT., Ph.D
Pembimbing II : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Dalam perkembangan teknologi mobil listrik saat ini, penelitian mengenai desain motor penggerak yang optimal, efisien, dan handal diperlukan guna meningkatkan performa dari kendaraan listrik. Desain motor penggerak yang *compact* dengan *power to weight ratio* yang tinggi dibutuhkan dalam fungsi aplikasi motor penggerak mobil listrik.

Pada tugas akhir ini dilakukan pembuatan desain dan analisis motor *axial flux brushless DC*. Motor ini dikenal memiliki tingkat *power to weight ratio* yang tinggi. Motor ini dirancang untuk menghasilkan output daya 25 kW. Pada Tugas akhir ini dilakukan analisis parameter - parameter kelistrikan pada motor, seperti torsi, efisiensi, *losses*, dan kuat medan listrik yang terbentuk pada motor dengan menggunakan metode analisis *finite element*.

Hasil pembuatan desain didapatkan desain motor *axial flux brushless DC* dengan ukuran 220 cm menggunakan 12 slot stator dan 10 kutub rotor. Menghasilkan rating daya output 27 kW, dengan kecepatan rating 2388 rpm dan torsi 109 Nm. Motor ini memiliki rating tegangan 400 V dc dan arus masukan pada motor sebesar 82,47 A.

Kata Kunci : Motor *axial flux brushless DC*, Analisa *finite element* motor

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND ANALYSIS AXIAL FLUX BRUSHLESS DC MOTOR BASED 3D FINITE ELEMENT METHOD FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION

Name : Gede Bayu Anugrah Janardana
1st Advisor : Heri Suryoatmjo, ST., MT., Ph.D
2nd Advisor : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

In development of electric vehicle technology, research on the optimal design of motor drive, with high efficiency, and high reliability, necessary to improve the performance of electric vehicles. The compact design of motor drive with a high power to weight ratio is required in motor drive function for the application of electric cars.

This final project design and analysis of axial flux brushless DC motor. It's known have a high power to weight ratio. This motor is designed to produce 25 kW power output. In this final project analyze the electrical parameters of the motor, such as torque, efficiency, losses, and flux density that's formed on the motor by using finite element analysis.

The results obtained a design of axial flux brushless DC motor with diameter 220 cm using a 12 slot of stator and 10 rotor poles. Generate output power rating of 27 kW, with a speed of 2388 rpm and torque rating 109 Nm. This motor has a voltage rating of 400 V dc and input current to the motor of 82,47 A.

Keywords : Axial flux brushless DC motor, Finite element analysis of motor

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Ida Sang Hyang Widhi Wasa, karena berkat rahmat dan tuntunannya penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir Penulis yang berjudul : **“Desain dan Analisis Motor Axial Flux Brushless DC Berbasis 3D Finite Element Method untuk Aplikasi Kendaraan Listrik”** ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Heri Suryo dan Bapak Prof. Ashari, atas segala tuntunan dan waktunya dalam membimbing penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Keluarga, adik - adik penulis, Pram, Nanda dan Putri, yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis selama mengerjakan tugas akhir.
4. Sahabat dan rekan terkasih penulis, Yuni Mentari yang selalu memberikan dorongan, semangat dan dukungan sehingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini tepat waktu.
5. Mas Bagar, Mas Agus, Mas Uta, Mbak Santi yang membukakan jalan penulis dan membimbing untuk memahami dan mengerti secara mendalam terkait topik tugas akhir ini.
6. Seluruh dosen, dan staff karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
7. Teman-teman Angkatan 2011 yang membantu penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
8. Teman-teman Laboratorium Konversi Energi B.101 yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis dapat wisuda ke-111.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, 28 Desember 2014

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
 BAB 2 TINJAUAN MOTOR AXIAL FLUX BRUSHLESS DC	
DALAM IMPLEMENTASI MOBIL LISTRIK	7
2.1 Perkembangan Mobil Listrik	7
2.2 Jenis Motor Penggerak pada Mobil Listrik.....	8
2.3 Motor <i>Brushless DC</i>	11
2.4 Motor <i>Axial Flux Brshless DC</i>	11
2.5 Konstruksi Motor <i>Axial Flux Brshless DC</i>	11
2.6 Bagian - bagian <i>Axial Flux Brshless DC</i>	13
2.6.1 Stator.....	13
2.6.2 Rotor	14
2.6.3 <i>Core</i>	14
2.6.4 <i>Hall Sensor</i>	15
2.6.5 <i>Controller</i> dan Inverter	17
2.7 Prinsip Kerja Motor <i>Axial Flux Brshless DC</i>	18
2.8 Metode <i>Finite Element</i>	20

BAB 3 DESAIN DAN PERENCANAAN MOTOR *AXIAL FLUX*

<i>BLDC</i>	23
3.1 Dasar Perhitungan <i>Axial Flux</i> BLDC dengan Sumber Eksitasi DC Gelombang Persegi	23
3.2 Penentuan Spesifikasi Motor	24
3.2.1 Perhitungan Kebutuhan Arus	24
3.2.2 Perhitungan <i>Loading Value</i>	25
3.2.3 Perhitungan Jari – jari Motor	26
3.2.4 Penentuan Nilai Torsi	27
3.2.5 Penentuan <i>Air Gap</i>	28
3.2.6 Perhitungan Nilai Kerapatan <i>Flux</i> di <i>Air Gap</i>	29
3.3 Desain Motor <i>Axial Flux</i> BLDC Pada <i>Software</i> Solidwork ...	30
3.3.1 Pembuatan Desain Stator	31
3.3.2 Pembuatan Belitan Stator	32
3.3.3 Pembuatan Desain Rotor	34
3.3.4 Penggabungan Desain	35
3.3.5 Desain Luasan <i>Vacuum</i>	36
3.3.6 Pasca Desain	37
3.4 Pemodelan Motor <i>Axial Flux</i> BLDC Pada <i>Software</i> Ansys Maxwell	38
3.4.1 Metode Pemodelan Menggunakan Fitur RMxprt	39
3.4.1.1 Penentuan Parameter Umum Mesin	39
3.4.1.2 Penentuan Parameter Stator	40
3.4.1.3 Penentuan Data Rotor	43
3.4.1.4 Penentuan Data <i>Shaft</i>	44
3.4.2 Penentuan <i>Boundaries</i>	45
3.4.3 Penentuan Eksitasi	45
3.4.4 Penentuan <i>Meshing</i>	46
3.4.5 <i>Solution Setup</i>	47
3.5 Simulasi Motor <i>Axial Flux</i> BLDC Pada <i>Software</i> Ansys Maxwell	47
3.5.1 Metode Analisis <i>Transient</i>	47
3.5.2 Analisis <i>Transient 3D</i>	48

BAB 4 HASIL PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULASI	51
4.1 Hasil Desain Pemodelan Motor <i>Axial Flux</i> BLDC	51
4.1.1 Desain dan Spesifikasi Stator	51
4.1.2 Desain dan Spesifikasi Rotor	55
4.1.3 Desain <i>Assembly</i>	56
4.1.4 Desain dan Spesifikasi <i>Controller</i> Motor	57
4.2 Analisa Hasil Parameter Simulasi.....	59
4.2.1 Karakteristik Input Motor	59
4.2.2 Karakteristik Torsi Kecepatan	64
4.2.3 Karakteristik Daya Input.....	66
4.2.4 Karakteristik DayaOutput	67
4.2.5 Efisiensi	67
4.2.6 Karakteristik Medan Stator	67
4.2.7 Karakteristik Aliran Arus Stator	69
4.2.8 Karakteristik Medan pada <i>Air Gap</i>	71
4.2.9 <i>Losses</i> Motor.....	72
BAB 5 PENUTUP.....	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA	77
RIWAYAT HIDUP	79

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Spesifikasi Mobil Listrik yang telah diproduksi 8
Tabel 2.2	Jenis Motor Penggerak Mobil Listrik yang telah diproduksi..... 10
Tabel 2.3	Perbandingan Jenis Penggerak Motor..... 10
Tabel 2.4	Komposisi Material Campuran Penyusun St37 Dalam (%) Motor 15
Tabel 3.1	<i>Combination Of Numbers Slot And Pole With Balanced Concentration Winding</i> 25
Tabel 3.2	Perbandingan Daya Output Dan Torsi Pada Mobil Listrik Komersial..... 28
Tabel 3.3	Penentuan Data Umum Mesin 39
Tabel 3.4	Parameter Umum Stator..... 40
Tabel 3.5	Parameter Slot Motor..... 41
Tabel 3.6	Parameter Inti Stator..... 41
Tabel 3.7	Parameter Kumparan Stator 42
Tabel 3.8	Parameter Rangkaian Kontrol..... 43
Tabel 3.9	Spesifikasi Inti Rotor 44
Tabel 3.10	Spesifikasi Magnet Permanen 44
Tabel 3.11	Spesifikasi Shaft Motor 44
Tabel 4.1	Data Spesifikasi Stator..... 52
Tabel 4.2	Data Spesifikasi Slot Stator 53
Tabel 4.3	Data Spesifikasi Belitan Stator 54
Tabel 4.4	Data Spesifikasi Stator Motor..... 55
Tabel 4.5	Spesifikasi Rangkaian Kontrol 57
Tabel 4.6	Karakteristik Medan Stator..... 68
Tabel 4.7	Karakteristik Arah Aliran Arus Stator..... 70
Tabel 4.8	Karakteristik Medan pada <i>Air Gap</i> 71

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Tipe penggerak pada mobil listrik	9
Gambar 2.2 Tipe tipe konstruksi motor <i>axial flux</i> BLDC	12
Gambar 2.3 Bagian – bagian motor <i>axial flux</i> BLDC	13
Gambar 2.4 Gambar belitan stator motor <i>axial flux</i> BLDC	13
Gambar 2.5 Rotor motor <i>axial flux</i> bldc.....	14
Gambar 2.6 Grafik B vs H pada ST37	15
Gambar 2.7 <i>Sensor hall</i>	16
Gambar 2.8 Mekanisme <i>hall sensor</i> dan hasil EMF balik.....	16
Gambar 2.9 Rangkaian <i>controller</i> dan inverter motor <i>axial flux</i> BLDC	17
Gambar 2.10 Prinsip medan magnet pada motor.....	18
Gambar 2.11 Prinsip kerja motor <i>axial flux</i> Blde	19
Gambar 2.12 Arah perputaran rotor sesuai dengan pensaklaran	20
Gambar 3.1 Penampang <i>axial flux permanent magnet coreless</i> <i>brushless DC motor</i>	26
Gambar 3.2 Kurva efisiensi vs perbandingan diameter motor	27
Gambar 3.3 Sistematika pemodelan motor menggunakan solidwork	30
Gambar 3.4 Sketsa stator motor <i>axial flux</i> BLDC	31
Gambar 3.5 Desain inti stator.....	31
Gambar 3.6 (a) Desain inti stator (b) Desain stator plate	32
Gambar 3.7 Desain belitan stator	32
Gambar 3.8 (a) Desain <i>split</i> bagian pada belitan stator (b) <i>Circular</i> <i>Pattern</i> belitan stator	33
Gambar 3.9 Desain stator lengkap motor <i>axial flux</i> BLDC.....	34
Gambar 3.10 Desain rotor motor <i>axial flux</i> BLDC	35
Gambar 3.11 Penggabungan desain motor	35
Gambar 3.12 Desain <i>band</i> motor <i>axial flux</i> BLDC	36
Gambar 3.13 Desain <i>air shpere</i> motor <i>axial flux</i> BLDC	37
Gambar 3.14 Diagram alir pemodelan dan simulasi motor <i>axial</i> <i>flux</i> BLDC	38
Gambar 3.15 Tipe rangkaian kontrol stator (Tipe Y-3 fasa).....	40
Gambar 3.16 Tipe slot motor.....	41
Gambar 3.17 Tipe lilitan.....	43
Gambar 3.18 Penentuan <i>Boundaries</i> pada motor	45

Gambar 3.19 Arah eksitasi: (a) fasa A (b) fasa a (c) fasa B (d) fasa b' (e) fasa C (f) fasa c	46
Gambar 3.20 <i>Meshing</i> pada motor <i>Axial Flux</i> BLDC	47
Gambar 4.1 Desain stator motor dengan <i>software</i> Solidwork.....	51
Gambar 4.2 Desain stator motor dengan <i>software</i> Ansys Maxwell	52
Gambar 4.3 Desain rotor motor dengan <i>software</i> Solidwork.....	55
Gambar 4.4 Desain rotor motor dengan <i>software</i> Ansys Maxwell	55
Gambar 4.5 Desain <i>assembly</i> motor <i>axial flux</i> BLDC menggunakan <i>software</i> Solidwork	56
Gambar 4.6 Desain <i>assembly</i> motor <i>axial flux</i> BLDC menggunakan <i>software</i> Ansys Maxwell.....	57
Gambar 4.7 Rangkaian kontrol motor	58
Gambar 4.8 Bentuk gelombang arus untuk t selama 6,6 ms	60
Gambar 4.9 Bentuk gelombang arus untuk t selama 100 ms	60
Gambar 4.10 Bentuk gelombang tegangan untuk t selama 6,6 ms	61
Gambar 4.11 Bentuk gelombang tegangan untuk t selama 100 ms	61
Gambar 4.12 Bentuk gelombang tegangan dan arus salah satu fasa motor	62
Gambar 4.13 Selisih waktu saat $I = 0$ dan $V = 0$	63
Gambar 4.14 Periode gelombang	63
Gambar 4.15 Nilai torsi motor dengan $n = 2388$ RPM, $t = 10$ ms	64
Gambar 4.16 Nilai torsi motor dengan $n = 2388$ RPM, $t = 100$ ms	65
Gambar 4.17 Grafik torsi vs kecepatan motor <i>axial flux</i> BLDC	66
Gambar 4.18 <i>Stranded losess</i> pada motor	73

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan kebutuhan kendaraan listrik (*Electric Vehicles*) di masa depan, telah banyak mendorong para peneliti dan teknisi untuk mengembangkan teknologi guna meningkatkan efisiensi dan kemampuan daya dari kendaraan listrik tersebut. Sistem teknologi utama dalam sebuah kendaraan terdiri dari baterai, motor listrik, sambungan roda gigi dan komponen elektronika daya yang mendukung. Menjadi suatu hal yang sangat penting untuk para peneliti meningkatkan efisiensi dari seluruh komponen penyusun yang mendukung kendaraan listrik ini. Pemilihan desain motor yang optimal menarik perhatian guna meningkatkan efisiensi secara keseluruhan dari kendaraan listrik [1].

Perkembangan penelitian dibidang desain motor penggerak dalam implementasi untuk kendaraan listrik sudah banyak dilakukan guna mencari serta memaksimalkan parameter-parameter yang mampu meningkatkan efisiensi dari kendaraan listrik. Salah satu desain pengembangan motor penggerak yang cukup banyak digunakan dalam penelitian kendaraan listrik adalah penggunaan motor permanen magnet *brushless* DC (BLDC). Penelitian, Chang [2] menyimpulkan bahwa motor permanen magnet *brushless* DC baik digunakan sebagai penggerak kendaraan listrik, karena biayanya rendah, ringan, efisiensi tinggi, kecepatan tinggi dan torsiya besar.

Motor *Brushless* DC terdiri dari dua tipe motor, *axial flux* (AF) dan *radial flux* (RF). Di kelas motor penggerak untuk kendaraan listrik *axial flux* penggunaannya cukup bersaing dengan *radial flux* dengan beberapa keuntungan dari segi kekuatan penarikan bebannya, pembuangan panas, air gap, serta penggunaan besi punggung rotor [3]. Zhang et al. [4] dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa *axial flux* mampu lebih unggul dalam segi kerapatan daya, efisiensi serta torsiya.

Tugas Akhir ini memaparkan desain motor *axial flux* BLDC dengan rating daya output 25 kW. Desain motor menggunakan desain *axial flux* BLDC *Single sided* dengan 1 buah stator dan 1 buah rotor. Desain motor juga mencakup desain stator dan rotor, perbandingan jumlah *slot stator* dan jumlah kutub rotor, desain belitan stator dan desain air gap. Pada penelitian ini juga memaparkan analisis parameter - parameter kelistrikan pada motor dengan berbasis metode *finite element*

menggunakan *software* yang mampu menganalisis berbasis metode tersebut. Diharapkan melalui desain dan analisis motor *axial flux* BLDC ini mampu memberikan gambaran parameter-parameter pada motor ini sebagai acuan dalam pengembangan kendaraan listrik ke depan.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Desain motor *axial flux* BLDC dengan daya output 25000 Watt menggunakan perangkat lunak.
2. Analisis parameter-parameter kelistrikan pada motor *axial flux* BLDC dengan berbasis *finite element method*.

1.3. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, permasalahan di atas dibatasi sebagai berikut:

1. Desain dan simulasi menggunakan perangkat lunak Solidwork dan Ansys Maxwell 16.
2. Penelitian ini hanya membahas tentang desain motor *axial flux* BLDC dan analisis simulasinya terhadap parameter dibidang kelistrikan
3. Tidak membahas tentang proses kontrol inputan dan implementainya pada kendaraan listrik

1.4. Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan desain motor *axial flux* BLDC yang optimal sesuai dengan kebutuhan mobil listrik.
2. Untuk mengetahui pengaruh serta peran-peran setiap parameter kelistrikan pada sebuah motor *axial flux* BLDC.

1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Tahap ini merupakan langkah awal dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Dalam Studi Literatur, penulis mempelajari dasar-dasar tentang motor *axial flux* BLDC, mencakup prinsip kerja, jenis-jenis motor, metode kontrol serta parameter-parameter yang terkait dengan motor *axial flux* BLDC, seperti torsi,

kerapatan fluks, kuat medan, dan *losses*. Selain itu, penulis juga mempelajari metode *finite element* yang digunakan dalam mencari parameter-parameter yang berhubungan kelistrikan dengan motor *axial flux* BLDC ini. Literatur yang digunakan dalam studi literatur diambil dari buku, jurnal ilmiah, prosiding serta artikel.

2. Perancangan, dan Perhitungan

Penulis melakukan perancangan desain motor *axial flux* BLDC dengan menentukan parameter fisik pada motor seperti jumlah slot stator, jumlah kutub rotor, jumlah lilitan, nilai tegangan, nilai rating torsi dan kecepatan. Kemudian penulis melakukan perhitungan terhadap parameter tersebut untuk mendapatkan nilai output daya yang sesuai dengan kebutuhan motor.

3. Desain dan simulasi

Penulis melakukan proses desain motor *axial flux* BLDC dengan menggunakan perangkat lunak Solidwork dan Ansys Maxwell 16. Proses desain dilakukan dengan memasukkan parameter fisik motor yang telah dihitung sebelumnya untuk didapatkan bentuk desain motor yang presisi. Setelah melakukan proses desain, kemudian penulis mensimulasikan kinerja motor dengan perangkat lunak tersebut untuk mendapatkan keluaran nilai parameter - parameter kelistrikan pada motor, seperti torsi, kerapatan fluks, kuat medan, *losses* serta daya keluaran dari motor.

4. Analisis Data

Dari simulasi akan didapatkan hasil yang akan dianalisis seperti torsi, daya output, kuat medan, arus keluaran, *losses*, dan efisiensi. Hasil simulasi juga akan dibandingkan dengan hasil perhitungan untuk mendapatkan hasil desain yang valid.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir

Proses dan hasil penelitian akan ditulis dalam laporan sebagai hasil penelitian dari Tugas Akhir ini.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut:

BAB 1 : Pendahuluan

Bagian ini membahas dasar-dasar penyusunan Tugas Akhir ini meliputi latar belakang, permasalahan yang diangkat,

tujuan yang diharapkan, batasan masalah, metodologi pembuatan Tugas Akhir, sistematika dan relevansi penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

BAB 2 : Tinjauan Pustaka

Bagian ini membahas teori-teori penunjang yang melandasi Tugas Akhir ini, seperti dasar motor *axial flux* BLDC, perkembangan mengenai mobil listrik, serta metode *finite element* sebagai metode yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.

BAB 3 : Desain dan Simulasi

Bagian ini berisi proses desain, pemodelan serta simulasi yang dikerjakan pada motor *axial flux* BLDC, dimulai dari perancangan desain motor, penentuan parameter motor, penentuan parameter penyelesaian, proses penyelesaian serta pengambilan data.

BAB 4 : Hasil Simulasi dan Analisis Data

Bagian ini membahas mengenai hasil simulasi yang didapatkan dari proses penyelesaian perhitungan yang dilakukan perangkat lunak pemodelan, serta analisa terhadap parameter-parameter kelistrikan yang didapatkan dari proses tersebut.

BAB 5 : Penutup

Bagian ini membahas kesimpulan yang dapat diambil dari pemodelan serta simulasi dan perhitungan parameter-parameter kelistrikan pada motor *axial flux* BLDC. Selain itu juga dilampirkan saran yang diharapkan mampu memberikan perbaikan serta penyempurnaan terkait keberlanjutan Tugas Akhir ini.

1.7. Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi penelitian untuk peneliti selanjutnya dalam mengembangkan desain motor *axial flux* BLDC untuk implementasinya pada mobil listrik.
2. Dapat memberikan gambaran pengaruh penentuan desain motor *axial flux* BLDC terhadap nilai keluaran dari parameter-parameter kelistrikan pada motor *axial flux* BLDC.

3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengambil topik yang serupa untuk Tugas Akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN MOTOR AXIAL FLUX BRUSHLESS DC DALAM IMPLEMENTASI MOBIL LISTRIK

Mobil listrik dalam perkembangannya terus mendapatkan sorotan dalam segi peningkatan performanya. Para peneliti di bidang mobil listrik berupaya melakukan peningkatan dalam beberapa segi pada mobil listrik, seperti peningkatan kapasitas baterai, teknologi *controller*, efisiensi motor penggerak, hubungan *gear*, dan komponen lainnya. Salah satu yang banyak dilakukan adalah pengembangan teknologi motor penggerak. Penelitian pada motor penggerak mobil listrik dirasa penting karena menjadi salah satu komponen utama pada mobil listrik. Penelitian dibidang desain motor penggerak, material penyusun motor, serta efisiensi menjadi topik utama dalam penelitian-penelitian pada motor penggerak mobil listrik. Desain dan pemilihan material yang tepat dalam penggunaan motor penggerak mampu memberikan efisiensi yang tinggi dengan nilai rugi-rugi yang rendah.

2.1. Perkembangan Mobil Listrik

Perkembangan mobil listrik memiliki sejarah yang panjang. Dimulai dari penemuan motor listrik yang memulai penelitian pembuatan mobil listrik pada awal tahun 1900, namun trend penelitian mobil listrik ini sempat meredup karena perkembangan mobil dengan mesin pembakaran yang dirasa lebih efisien. Kemudian di awal tahun 1970 dengan adanya isu krisis energi, membuat geliat pengembangan mobil listrik kembali bangkit. Dimulai dari pembuatan EV1 yang dimiliki oleh General Motor (GM), kemudian Ford membuat EV Ranger pick up truck, Toyota dengan Rav4 EV, Honda EV dari Honda. Geliat perkembangan ini berada pada rentang tahun 1990 – 2000.

Di awal tahun 2000, Perkembangan mobil listrik bergeser kearah *Hybrid Electric Vehicle* karena dirasa penggunaan energi listrik murni belum memadai dari segi infrastruktur, ekonomi, dan kebijakannya. Hingga akhirnya muncul beberapa jenis mobil dari beberapa pabrikan mobil yang diproduksi secara masal. Di awal tahun 2010 perkembangan mobil listrik dengan 100% sumber energinya menggunakan energi listrik mulai bermunculan dan masuk ke pasar komersial. Perkembangan ini juga didukung dengan banyaknya kebijakan yang mendukung

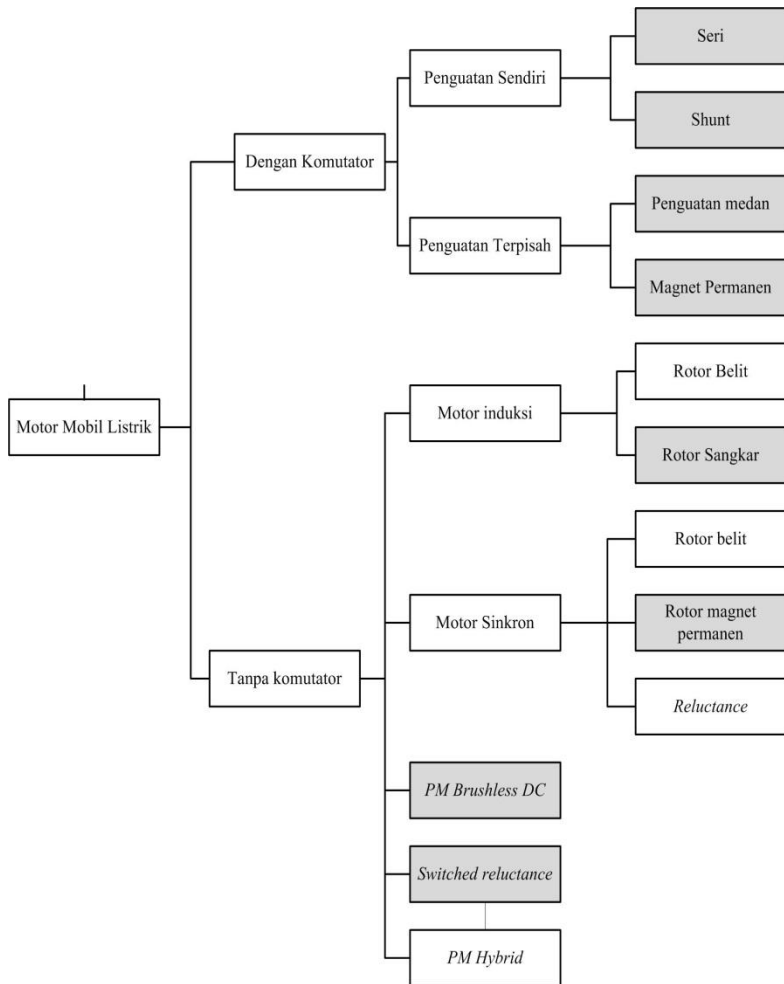
perkembangan mobil listrik, sehingga infrastruktur, dan fasilitas pendukungnya juga mulai berkembang.

Tabel 2.1. Spesifikasi mobil listrik yang telah diproduksi

Parameter	Merek Mobil Listrik				
	MAZDA Demio EV 2014	TOYOTA RAV4 EV	HONDA FIT EV 2014	Ford Focus Electric 2014	BMW i 3
Berat total (kg)	1180	1828.88	1475.08	1651.07	1194.76
Tipe Baterai	Lithium-ion	Lithium-ion	Lithium-ion	Lithium-ion	Lithium-ion
Tegangan Baterai (V)	346	386	100	240	360
Kapasitas Energi (kWh)	20	35	20	23	22
Tipe Motor	PM 3 phase AC synchronous	AC induction motor	AC Synchronous PM	PM electric traction	synchronous motor
Power Output (kW)	75	115	75	107	125
Maksimum Torsi Output (Nm)	150	295,56	256,24	249,47	250
Maksimum Kecepatan	12000 (rpm)	85 mph	3695-10320 (rpm)	4450 (rpm)	93 mph

2.2. Jenis Motor Penggerak pada Mobil Listrik

Pada teknologi mobil listrik terdapat beberapa macam jenis motor listrik yang banyak digunakan sebagai motor penggerak. Pada dasarnya jenis-jenis motor penggerak tersebut terbagi atas 2 jenis motor, yaitu motor dengan komutator dan motor tanpa komutator. Pembagian ini didasarkan terhadap penggunaan komutator yang berfungsi untuk mengalirkan arus ke rotor yang berfungsi untuk membangkitkan medan. Berikut ini beberapa jenis motor penggerak yang biasanya digunakan pada mobil listrik, berdasarkan penggunaan komutator pada motor.



Gambar 2.1. Tipe motor penggerak pada mobil listrik

Dalam perkembangannya terdapat beberapa jenis motor penggerak pada mobil listrik yang banyak digunakan. Terdapat beberapa faktor yang berpengaruh dalam pemilihan motor penggerak, diantaranya adalah *Power Density*, biaya, efisiensi dan keandalannya. Pada tabel 2.2.

berikut adalah jenis-jenis motor penggerak yang digunakan oleh beberapa pabrikan mobil listrik.

Tabel 2.2. Jenis motor penggerak mobil listrik yang telah diproduksi

Merek	Tipe Motor Penggerak
Toyota RAV 4 EV	Motor Induksi
Mazda DEMIO EV	Motor Sinkron PM
Honda FIT EV 2014	Motor Sinkron PM
BMW i 3	Motor Sinkron
Suzuki Senior Tricycle	Motor DC PM
Ford Focus Electric 2014	Motor PM <i>Brushless</i>
Nisan LEAF 2015	Motor Sinkron
Conceptor G-Van	Motor DC penguatan terpisah

Seorang peneliti mobil listrik, Merve Yildirim dari Turki, membuat sebuah penelitian untuk membandingkan kelebihan dan kekurangan dari beberapa macam penggunaan motor penggerak pada mobil listrik, dari hasil penelitian didapatkan hasil seperti pada tabel 2.3. Dari hasil penelitian tersebut dapat dilihat bahwa motor jenis permanen magnet *brushless* DC menempati tempat pertama dalam segi efisiensi dan *power density*. Hal tersebut dikarenakan motor permanen magnet *brushless* DC mampu memberikan besaran daya dan torsi yang besar serta dimensi dan berat yang relatif kecil, sehingga sangat cocok untuk diterapkan sebagai motor penggerak mobil listrik.

Tabel 2.3. Perbandingan jenis penggerak motor

Indeks	Motor DC	Motor Induksi	Motor PM <i>Brushless</i>	Motor <i>Switch Reluctance</i>
Efisiensi	2	4	5	4,5
<i>Power Density</i>	2,5	3,5	5	3,5
Berat	2	4	4,5	5
Biaya	5	4	3	4
Total	11,5	15,5	17,5	17

2.3. Motor *Brushless DC*

Motor *Brushless DC* (BLDC) merupakan salah satu jenis motor DC yang konstruksinya menggunakan magnet permanen di bagian rotor dan Kumparan jangkar pada stator. Motor BLDC tidak menggunakan fungsi brush sebagai media eksitasi ke rotornya, namun fungsi tersebut digantikan oleh medan magnet yang telah ditimbulkan oleh magnet permanen pada bagian rotornya. Keuntungan yang paling jelas dari konfigurasi *brushless* adalah penghapusan *brush*, yang memudahkan perawatan dan menghilangkan rugi gesek akibat adanya kontak antara rotor dan *brush*. Motor BLDC lebih baik dibandingkan dengan motor induksi, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih baik dan faktor daya yang lebih baik dan, oleh karena itu, daya output yang lebih besar untuk *frame* yang sama. Terdapat dua jenis motor BLDC jika dilihat dari segi arah aliran *flux*-nya, yaitu radial *flux* BLDC dan axial *flux* BLDC. Di kelas motor penggerak untuk kendaraan listrik axial *flux* penggunaannya cukup bersaing dengan radial *flux* dengan beberapa keuntungan dari segi kekuatan penarikan bebannya, pembuangan panas, air gap, serta penggunaan besi punggung rotor. Zhang et al dan Yilmaz dalam penelitiannya membandingkan penggunaan axial *flux* dan radial *flux* dan menyimpulkan bahwa axial *flux* mampu lebih unggul dalam segi kerapatan daya (*power density*), torsi yang lebih besar, ringan, volume yang lebih kecil, dan efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan radial *flux*.

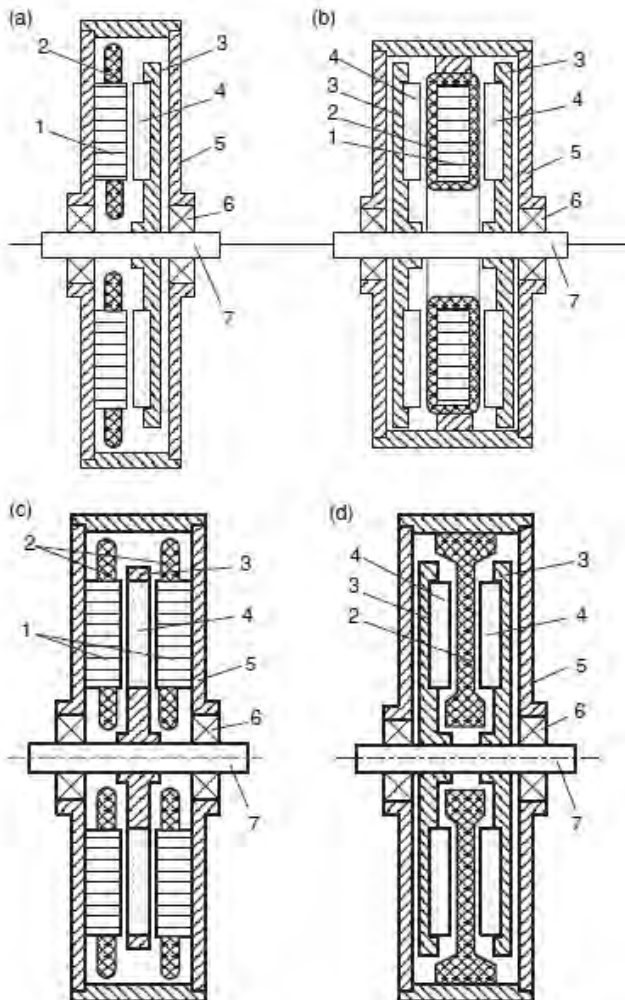
2.4. Motor *Axial Flux Brushless DC*

Motor axial *flux* BLDC dikenal juga dengan mesin *Disc* (cakram), dengan bentuknya yang *compact* dan kerapatan dayanya yang tinggi. Motor axial *flux* BLDC banyak digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik, pompa, kipas angin, kontrol katup, sentrifugal, peralatan mesin, robot dan peralatan industri. Selain itu, rotor berdiameter besar dengan momen inersia yang tinggi dapat dimanfaatkan sebagai *flywheel*. Pada dasarnya axial *flux* BLDC akan membangkitkan bentuk gelombang EMF berbentuk trapesoidal, dengan bentuk gelombang arus input kotak.

2.5. Konstruksi Motor *Axial Flux Brushless DC*

Motor axial *flux* BLDC dirancang untuk dapat mengalirkan *flux* secara axial. Dalam aplikasi mobil listrik penggunaan konstruksi secara axial diperlukan untuk memaksimalkan ruang pada kendaraan sehingga lebih terisi secara maksimal. Terdapat beberapa jenis konstruksi yang

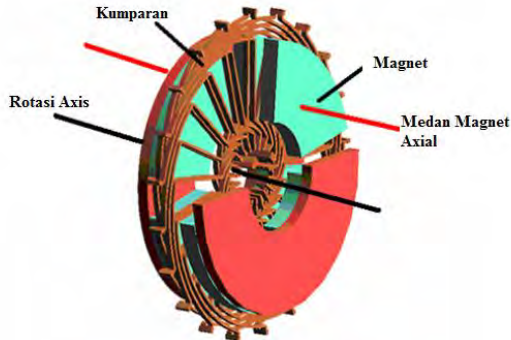
biasa digunakan dalam konstruksi motor *axial flux* BLDC, diantaranya seperti pada gambar 2.2. berikut.



Gambar 2.2. Tipe-tipe konstruksi motor *axial flux* BLDC: (a) mesin *single-sided slotted*, (b) mesin *double-sided slotless* dengan internal dan

internal PM rotor, (d) motor *double-sided coreless* dengan internal stator. 1. inti stator, 2. kumparan stator, 3. rotor, 4. Permanen Magnet, 5. *casing*, 6. *bearing*, 7. poros. (sumber : *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Second Edition, 7)

2.6. Bagian-bagian *Axial Flux Brushless DC*

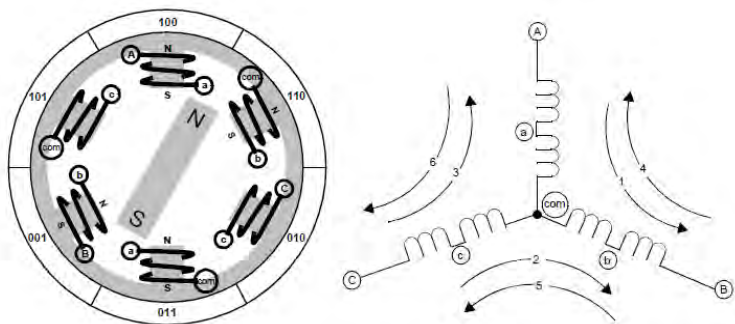


Gambar 2.3. Bagian-bagian motor *axial flux* BLDC

Motor *axial flux* BLDC umumnya memiliki bagian-bagian utama antara lain :

2.6.1. Stator

Stator pada motor *axial flux* BLDC merupakan suatu rangkaian yang terdiri dari beberapa belitan.

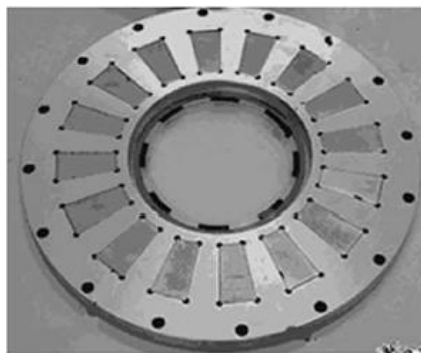


Gambar 2.4. Gambar belitan stator motor *axial flux* BLDC

Jumlah pasang kutub yang diciptakan di stator akibat dari arah lilitan berpengaruh terhadap performa dari motor *axial flux* BLDC. Selain itu jumlah lilitan yang digunakan juga berpengaruh terhadap besarnya medan magnet yang ditimbulkan di stator. Stator pada motor *axial flux* BLDC biasanya terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrolnya. Hubungan pada belitan juga mempengaruhi bentuk gelombang EMF (*Electro Motive Force*) baliknya.

2.6.2. Rotor

Rotor pada motor *axial flux* BLDC terdiri dari beberapa magnet permanen. Jumlah kutub magnet di rotor juga mempengaruhi ukuran langkah dan torsi dari motor. Jumlah kutub yang banyak akan memberikan gerakan presisi dan torsi yang kecil. Magnet permanen pada motor *axial flux* BLDC biasanya menggunakan jenis magnet neodymium. Neodymium Magnet merupakan magnet tetap yang paling kuat Magnet neodymium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), merupakan sejenis magnet langka-bumi, terbuat dari campuran logam neodymium, besi, dan boron yang membentuk struktur kristal Nd₂Fe₁₄B tetragona



Gambar 2.5. Rotor motor *axial flux* BLDC

2.6.3. Core

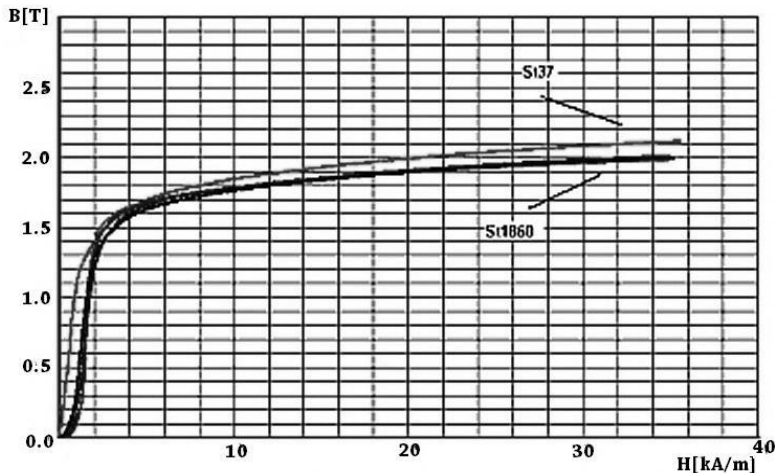
Core atau inti pada motor *axial flux* BLDC memiliki fungsi sebagai penghasil fluks maksimum. Core adalah media untuk menghasilkan gaya *ferromagnetic* yang biasanya bahannya berupa steel. Bahan yang baik digunakan sebagai *core* ialah logam yang memiliki

sifat ke magnetan yang baik. *Core* yang banyak digunakan adalah dari material steel jenis ST37. ST37 memiliki komposisi campuran antara besi (Fe) dengan berbagai jenis logam lainnya seperti pada tabel 1.

Tabel 2.4. Komposisi material campuran penyusun ST37 dalam (%)

Material Number 1.0037 - ST37-2/S235JR								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
Maks	Maks	Maks	Maks	Maks				Maks
0,17	0,3	1,4	0,045	0,045	-	-	-	0,009

Untuk sifat kemagnetan bahan dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Grafik B vs H pada ST37

Dari kurva di atas terlihat bahwa untuk B pada 0 sampai 1,4 Tesla material memiliki permeabilitas (μ) yang relatif sama

2.6.4. *Hall Sensor*

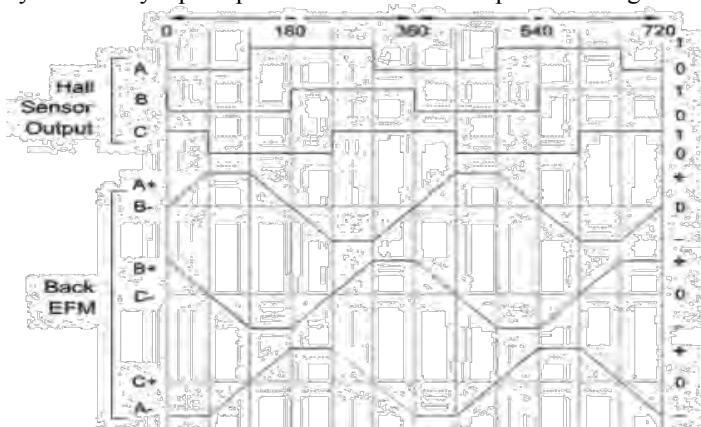
Untuk menentukan orientasi posisi rotor fungsi komutasi dilakukan oleh sensor, terdapat beberapa jenis sensor yang digunakan. Misalkan *optical encoder*, *magnetic encoder* atau *hall effect magnetic sensor*. Motor DC *brushless* dilengkapi dengan tiga sensor *hall effect magnetic*

yang ditempatkan dengan posisi tertentu, sebagaimana pada gambar 2.7. hall effect magnetic sensor akan berfungsi memberikan sinyal digital akibat adanya medan magnetic yang tegak lurus terhadap sensor. Sensor hall ini harus diletakkan sedekat mungkin dengan rotor magnet permanen untuk mendeteksi posisi kutub magnet pada rotor. Output hall akan akan dibaca oleh decoder. Dengan posisi tertentu sensor ini memiliki 6 komutasi logika yang berbeda, pergantian fase *supply* daya tergantung pada nilai-nilai sensor hall seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.7. *Sensor Hall*

Secara sederhana kerja hall sensor menggunakan prinsip induksi medan magnet. Saat daya elektron dibiaskan pada sisi kiri, akan mengakibatkan kutub negatif di sisi kiri dan kutub positif di sisi yang lain (kanan). Polaritas elektrik bergantung pada yang dialami sensor apakah ber kutub utara atau ber kutub selatan, dan digunakan untuk menyatakan sinyal pada posisi rotor dalam batas polaritas magnet.

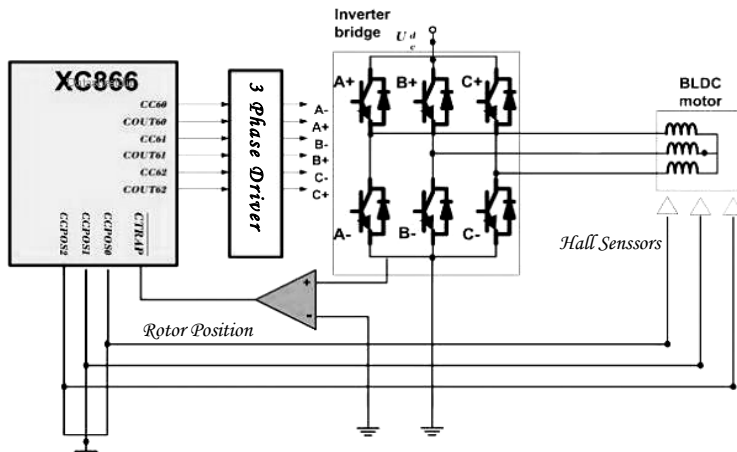


Gambar 2.8. Mekanisme *Hall sensor* dan hasil EMF balik

2.6.5. Controller dan Inverter

Controller pada motor *axial flux* BLDC berperan sangat penting dan dapat dikatakan sebagai penunjang utama operasi motor *axial flux* BLDC karena motor DC *brushless* membutuhkan suatu trigger pulsa yang masuk ke bagian elektromagnetik (stator) motor *axial flux* BLDC untuk memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran motor dapat diatur secara akurat. Inverter pada motor DC *brushless* berperan untuk mengubah tegangan DC yang masuk *controller* menjadi tegangan AC karena jenis motor DC *brushless* biasanya multi *pole* tiga phase maka dibutuhkan inverter tiga phase tegangan DC menjadi AC agar dapat berputar. Rangkaian kontrol pada motor DC *brushless* selain sebagai pengontrol perpindahan arus juga sebagai pengarah rotasi rotor. Oleh karena itu, *controller* membutuhkan beberapa cara untuk menentukan orientasi rotor. Beberapa kontroler menggunakan rancangan efek *hall* sensor dan *rotary encoder* untuk menentukan posisi rotor.

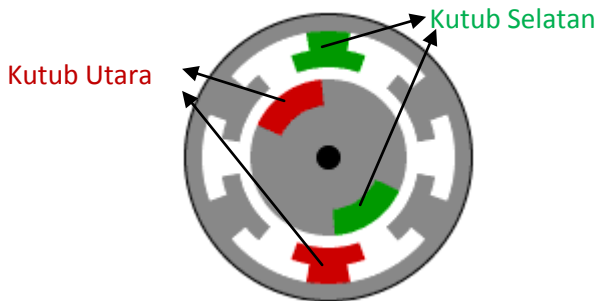
Saat ini banyak digunakan jenis kontroler modern yang menggunakan mikrokontroler dengan logika tertentu, dengan *decoder* akan mengatur *switching* transistor sehingga terbentuk pola *switching* yang tepat pada tiap fase untuk mengelola akselerasi, kontrol kecepatan dan menyempurnakan efisiensi.



Gambar 2.9. Rangkaian *controller* dan inverter motor *axial flux* BLDC

2.7. Prinsip Kerja Motor *Axial Flux Brushless DC*

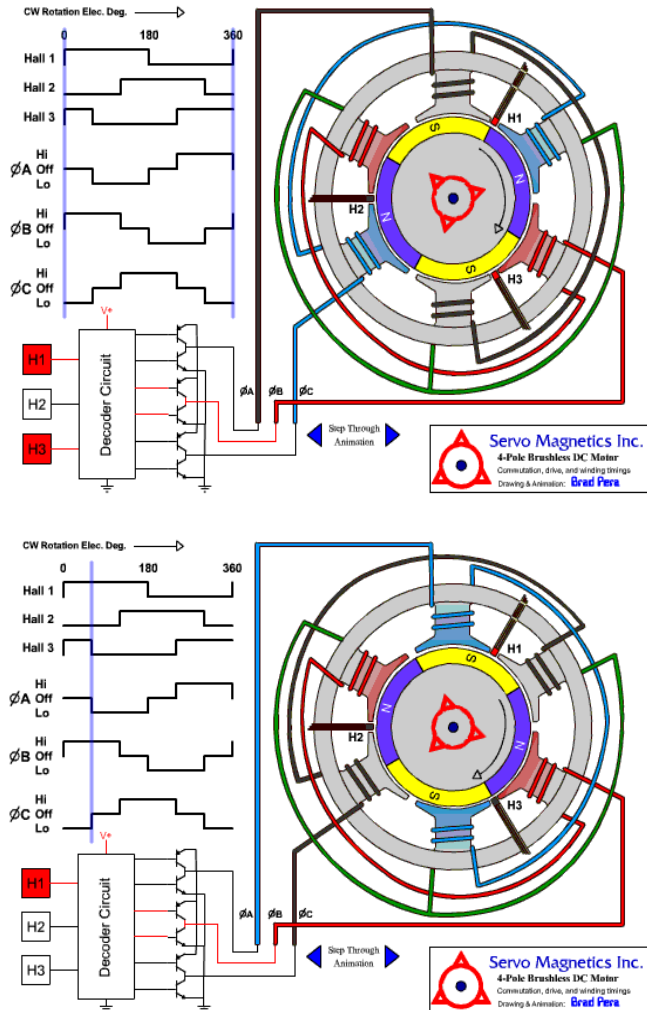
Prinsip kerja mendasar dari motor *axial flux* BLDC adalah teori mengenai medan magnet, saat suatu kutub utara dengan medan magnet yang keluar akan saling tolak menolak dengan kutub yang sejenisnya begitupun sebaliknya akan saling tarik menarik jika magnetnya berlawanan kutub. Dari prinsip sederhana diatas dapat diterapkan dalam penggunaan sistem kerja motor *axial flux* BLDC, yang memiliki medan magnet permanen pada rotornya dan elektro magnet (magnet yang ditimbulkan dari pemberian input arus listrik) pada bagian statornya melalui kumparan.



Gambar 2.10. Prinsip medan magnet pada motor

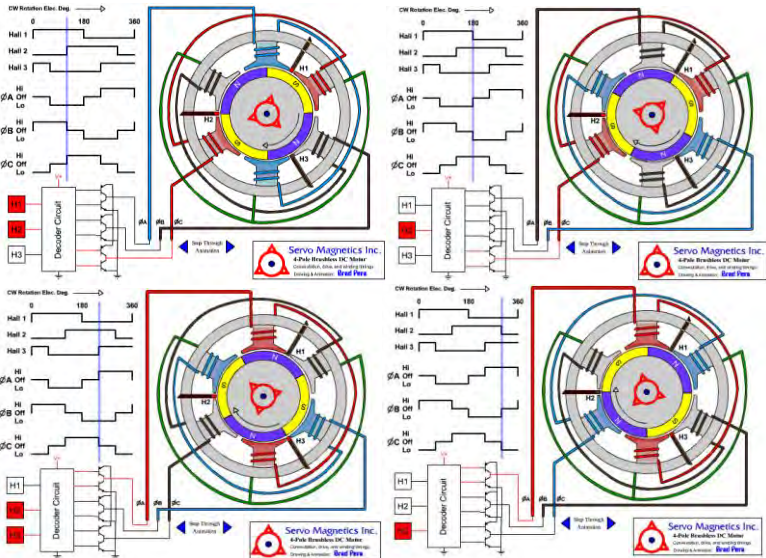
Pada motor *axial flux* BLDC fungsi pengaturan terhadap inputan arus yang harus diberikan ke kumparan stator untuk dapat menimbulkan medan elektro magnet yang tepat guna memutar rotor dilakukan oleh *Controller*. Elemen inilah yang menjadi elemen utama yang membedakannya dari motor DC konvensional, yang menggantikan kerja komutasi mekanisnya. Untuk memperlihatkan prinsip kerja motor *axial flux* BLDC secara detail, pada gambar 2.11. terdapat motor *axial flux* BLDC tiga fasa dengan 2 pasang kutub rotor. Terlihat pada gambar bahwa pengaturan di *sensing* menggunakan *hall effect* sensor sebagai penentu posisi. Tiga buah sensor *hall effect* H1, H2, H3 yang diletakkan pada ujung plat yang membentuk lingkaran dengan interval 120° secara bergantian akan terkena cahaya sesuai dengan urutan melalui shutter motor yang berputar dan dihubungkan dengan shaft motor. Pada gambar yang pertama, H2 mendeteksi flux magnetik kutub selatan dan decoder mengaktifkan B+ C-. Dalam kondisi ini kutub selatan yang terbentuk

pada kutub utara pada stator B karena arus listrik yang mengalir menuju C dan kutub selatan terbentuk pada C sehingga bergerak searah arah jarum jam.



Gambar 2.11. Prinsip kerja motor *axial flux* BLDC

Begitu seterusnya kutub rotor akan berjalan sesuai dengan pensaklaran yang terus beganti. Dengan mengulang proses pensaklaran sesuai urutan seperti terlihat pada gambar tersebut maka rotor permanent magnet akan berputar terus menerus. Berikut ini gambaran perputaran rotor sesuai dengan pensaklaran pada *controller*.



Gambar 2.12. Arah perputaran rotor sesuai dengan pensaklaran

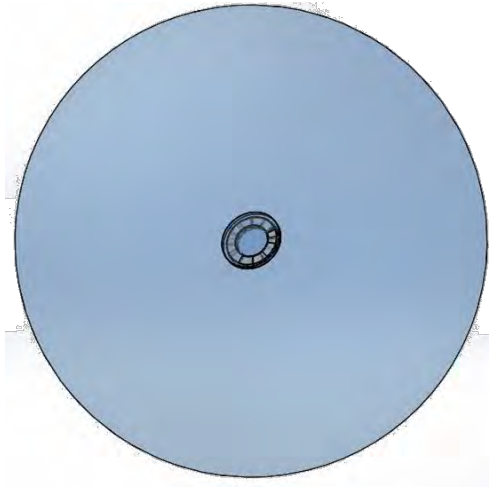
2.8. Metode *Finite Element*

Finitie Element adalah salah satu dari metode perhitungan yang memanfaatkan operasi matrix untuk menyelesaikan permasalahan fisik. Metode ini memerlukan suatu persamaan matematik yang merupakan model dari perilaku fisik. Semakin rumit perilaku fisiknya (karena kerumitan bentuk geometri, banyaknya interaksi beban, constrain, sifat material, dll) maka semakin sulit atau bahkan mustahil di bangun suatu model matematik yang dapat mewakili permasalahan tersebut secara utuh. Alternatif metodenya adalah dengan cara membagi kasus tersebut menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana yang mana pada bagian kecil tersebut dibangun model matematik dengan lebih sederhana. Kemudian interaksi antar bagian kecil tersebut ditentukan berdasarkan

fenomena fisik yang akan diselesaikan. Metode ini dikenal sebagai metode elemen hingga, permasalahan dibagi menjadi sejumlah elemen tertentu (*finite*) untuk mewakili permasalahan yang sebenarnya jumlah elemennya adalah tidak berhingga (kontinum). FEM sudah diaplikasikan secara luas mulai dari analisa stress (tegangan) dan deformasi (perubahan bentuk) pada bidang struktur bangunan, jembatan, penerbangan, dan otomotif, sampai pada analisa aliran fluida, perpindahan panas, medan magnet, dan masalah non-struktur lainnya.

Pada metode *finite element* untuk melakukan analisis pada desain motor tugas akhir ini digunakan software yang dapat melakukan perhitungan parameter-parameter kelistrikan dengan menggunakan metode *finite elemen*. *Software* yang digunakan adalah ANSYS Maxwell V.16.

Halaman ini sengaja dikosongkan



Gambar 3.13. Desain *Air Sphere* motor *axial flux* BLDC

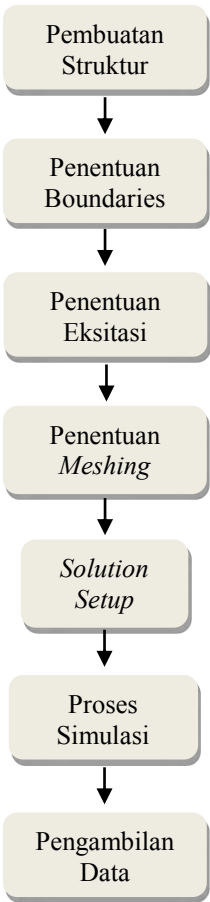
3.3.6 Pasca desain

Setelah seluruh proses desain dilakukan terdapat beberapa proses yang harus dilakukan untuk menyempurnakan desain tersebut. Dalam *software* Solidwork dapat dilakukan proses pengujian dan simulasi motor dengan menggunakan metode *finite element*. Untuk dapat melakukan proses pengujian tersebut terdapat beberapa penentuan parameter yang harus dilakukan terlebih dahulu. Penentuan pertama adalah menentukan material dari tiap-tiap bagian pada motor. Penentuan ini disesuaikan dengan *library* material pada Solidwork.

Proses selanjutnya mengatur arah orientasi dari medan magnet pada motor *axial flux* BLDC. Berikutnya adalah proses penentuan eksitasi pada belitan stator, pada bagian ini sangat penting untuk menentukan arah belitan dari lilitan stator itu sendiri. Setiap belitan harus disetting arah masuk dan keluarnya belitan, dengan mendefinisikan bidang mana yang dijadikan bagian masukan dan keluaran. Setelah proses penentuan belitan stator, maka selanjutnya motor siap untuk dilanjutkan dalam proses pengujian dan simulasi.

3.4. Pemodelan Motor *Axial Flux* BLDC Pada *Software* Ansys Maxwell

Dalam pemodelan dan simulasi motor axial flux BLDC menggunakan *software* Ansys Maxwell terdapat beberapa tahap pemodelan dan simulasi. Berikut ini Diagram alir pemodelan dan simulasi motor *axial flux* menggunakan *software* Ansys Maxwell.



Gambar 3.14. Diagram alir pemodelan dan simulasi motor *axial flux* BLDC pada *software* Ansys Maxwell

Dari diagram alir diatas dapat dilihat bahwa terdapat beberapa tahap pemodelan dan simulasi motor *axial flux* BLDC menggunakan *software* Ansys Maxwell, dimulai dari tahap pembuatan struktur motor, pengaturan parameter pemodelan, diantaranya penentuan boundaries, penentuan sistem eksitasi pada belitan, penentuan *meshing*, penentuan metode penyelesaian (*solution setup*), proses simulasi, dan paska proses dalam hal ini pengambilan data.

Proses pertama adalah pembuatan struktur motor. Dalam pembuatan struktur motor pada *software* Ansys Maxwell, terdapat 2 tipe desain model yaitu 2D Maxwell dan 3D Maxwell. Melalui 2 tipe diatas dapat didesain motor baik dalam bentuk 2 dimensinya maupun 3 dimensinya. Terdapat 2 metode desain motor yang digunakan untuk melakukan simulasi *finite element* di *software* ini. Pertama dengan, menggunakan desain yang telah dibuat pada *software* Solidwork sebelumnya dan melakukan penyesuaian desain, dan cara kedua yaitu dengan menggunakan fitur RMxpert yang tersedia dalam Ansys Maxwell.

3.4.1. Metode Pemodelan menggunakan fitur RMxpert

Rotational Machine Expert (RMxpert) adalah fitur interaktif yang digunakan untuk merancang dan menganalisa mesin listrik. Untuk melakukan pemodelan motor *axial flux* BLDC pada RMxpert ini dilakukan beberapa tahap perancangan design.

3.4.1.1. Penentuan Parameter Umum Mesin

Pada bagian ini di masukkan besaran nilai parameter umum dari mesin, seperti jenis motor, jenis sumber masukan, jenis rotor, jenis stator, serta panjang air gap.

Tabel 3.3. Penentuan data umum mesin

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Jenis Sumber	DC		
Struktur	Axial-Flux Rotor		
Tipe Stator	Axial_AC		
Tipe Rotor	Axial_PM		
Double-Sided	Rotor		
Panjang Air-gap	1	mm	1mm

Dari tabel diatas memperlihatkan karakteristik dari motor *axial flux* BLDC yang dibuat memiliki input DC dengan bentuk stator berupa lilitan, dan rotor berupa megnet permanen dengan panjang airgap 1mm.

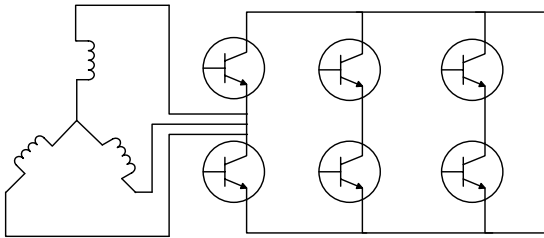
3.4.1.2. Penentuan Parameter Stator

Pada penentuan parameter stator terdapat beberapa masukan yang harus ditentukan, diantaranya parameter umum stator, parameter inti stator, parameter slot, parameter lilitan dan rangkaian kontrol dari stator. Pada penentuan parameter umum stator dimasukkan data seperti tabel 3.4.

Tabel 3.4. Parameter umum stator

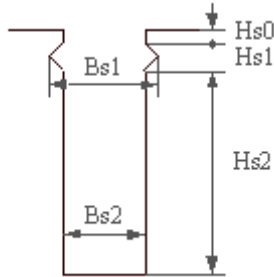
Nama	Nilai
Jumlah kutub	10
Jumlah Slot	12
Jenis Rangkaian	Y3
Tipe Slot	6
Kontrol Posisi	Ya

Pada parameter umum ini ditentukan jumlah kutub sebanyak 10 dan jumlah slot pada stator sebanyak 12 dengan jenis rangkaian kontrol tipe Y3 dengan kontrol posisi pada motor.



Gambar 3.15. Tipe Rangkaian kontrol stator (Tipe Y-3 fasa)

Di tentukan pula tipe slot yang digunakan pada stator motor ini adalah tipe 6, seperti gambar 3.16.



Gambar 3.16. Tipe Slot motor

Dalam penentuan besaran slot dipilih panjang slot sesuai dengan tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5. Parameter slot motor

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Hs0	1	mm	1mm
Hs1	0	mm	0mm
Hs2	27	mm	27mm
Bs1	13	mm	13mm
Bs2	13	mm	13mm

Penentuan parameter stator berikutnya adalah penentuan parameter inti stator. Pada tabel 3.6 akan memperlihatkan nilai penentuan yang dimasukkan dalam pemodelan inti stator motor *axial flux* BLDC.

Tabel 3.6. Parameter inti stator

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Diameter luar	220	mm	220mm
Diameter dalam	104,5	mm	104.5mm
Panjang	30	mm	30mm
Faktor Laminasi	0,95		
Jenis Material	D23_50		

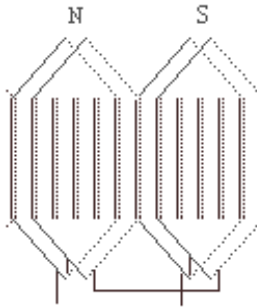
Untuk parameter faktor laminasi adalah faktor yang menyatakan seberapa besar suatu inti besi terlaminasi, dengan besaran maksimum 1 yang berarti bahwa logam tersebut tidak terlaminasi sama sekali. Untuk jenis material inti dipilih jenis material dengan kode *library* D23_50 yaitu berupa besi dengan kerapatan masa 7820.

Parameter stator berikutnya adalah kumparan. Dalam melakukan penentuan parameter kumparan terdapat beberapa masukkan yang harus di masukkan, tabel 3.7 memperlihatkan parameter yang harus ditentukan dalam kumparan.

Tabel 3.7. Parameter kumparan stator

Nama	Nilai	Deskripsi
Lapisan kumparan	2	Jumlah lapisan kumparan
Tipe kumparan	<i>Whole-Coiled</i>	Tipe kumparan stator
Cabang Paralel	1	Jumlah cabang paralel dari kumparan stator
Jumlah lilitan	34	Jumlah lilitan stator
Coil Pitch	1	Coil pitch yang diukur dalam measured dalam jumlah slot
Jumlah <i>strands</i>	1	Jumlah kawat per konduktor
Bungkus Kawat	0	Ketebalan bungkus kawat, 0 untuk desain otomatis
Ukuran konduktor	lebar: 0mm Tebal: 0mm	Ukuran konduktor
Tipe konduktor	copper	Jenis inti konduktor

Untuk tipe kumparan dipilih tipe *whole coiled*, metode lilitan dari jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.17 Berikut.



Gambar 3.17. Tipe lilitan

Penentuan parameter rangkaian kontrol yang digunakan pada motor axial flux BLDC ini adalah seperti spesifikasi tertera pada tabel 3.8.

Tabel 3.8. Parameter rangkaian kontrol motor

Nama	Nilai	Satuan
Tipe kontrol	DC	
Lead Angle of Trigger	0	deg
Lebar pulsa triger	120	deg
Drop transistor	0,7	V
Drop dioda	0,7	V

3.4.1.3. Penentuan data Rotor

Dalam penentuan data pada rotor terdapat parameter-parameter masukan yang harus ditentukan, diantaranya jumlah kutub, spesifikasi inti rotor, dan spesifikasi magnet permanen yang digunakan. Pada penentuan jumlah kutub pada rotor dipilih jumlah kutub sebanyak 10 kutub. Spesifikasi inti rotor menggunakan jenis besi yang sama dengan jenis inti stator dengan spesifikasi tertera pada tabel 3.9.

Tabel 3.9. Spesifikasi inti rotor

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Diameter luar	220	mm	220 mm
Diameter dalam	104,5	mm	104,5 mm
Panjang	10	mm	10 mm
Faktor laminasi	0,95	-	-
Jenis material	D23_50	-	-
Lebar kemiringan	0	-	0

Spesifikasi magnet permanen yang digunakan sesuai dengan spesifikasi pada tabel 3.10.

Tabel 3.10. Spesifikasi magnet permanen

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Embrace	0,7		0,7
Tipe magnet	XG96/40		
Panjang magnet	57,75	mm	57,75mm
Ketebalan magnet	8	mm	10mm

3.4.1.4. Penentuan data *Shaft*

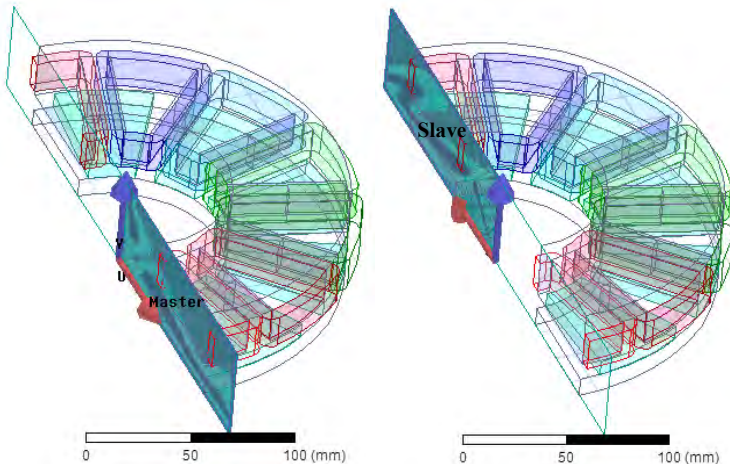
Spesifikasi shaft motor axial flux BLDC yang digunakan sesuai dengan spesifikasi yang tertera pada tabel 3.11.

Tabel 3.11. Spesifikasi Shaft motor

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
<i>Shaft</i> magnetik	NO		
Rugi gesek	12	W	12W
Rugi angin	12	W	12W
Referensi kecepatan	2388	rpm	

3.4.2. Penentuan *Boundaries*

Penentuan *Boundaries* pada pemodelan yang menggunakan dasar finite element dalam proses simulasinya merupakan bagian yang sangat penting. Pada bagian ini akan dilakukan penentuan bagianbagian dari tiap desain mana yang menjadi bagian terpapar medan terinduksi eksitasi. Pada bagian ini dilakukan juga penentuan arah medan. Untuk desain motor *axial flux* BLDC digunakan jenis *Master Slave Transient Boundaries*. Metode ini akan mencocokkan besaran medan dan arah medan dari potongan desain motor. Proses ini bertujuan untuk meringankan kerja proses simulasi karena hanya mencuplik sebagian daerah dari motor, dan sisa perhitungannya disamakan dengan pengaturan pada *Master* dan *Slave*.



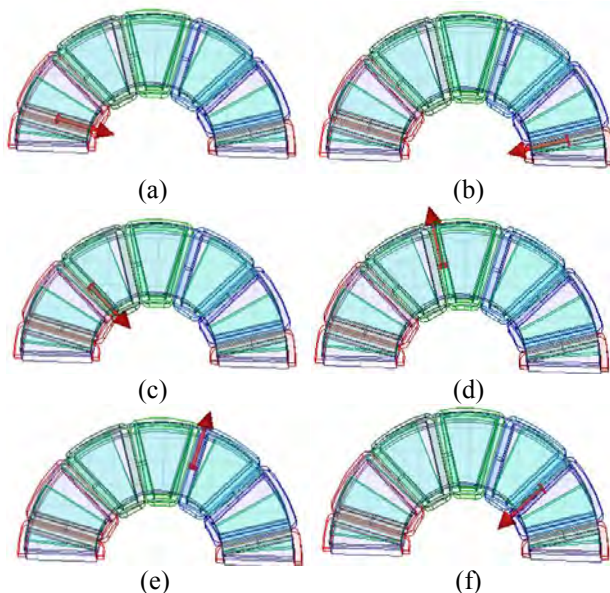
Gambar 3.18. Penentuan *Boundaries* pada motor

3.4.3. Penentuan Eksitasi

Penentuan eksitasi merupakan proses penentuan arah belitan, jumlah lilitan dan penentuan daerah masuk dan keluarnya arus pada belitan. Proses ini menentukan konfigurasi belitan yang akan digunakan. Pada desain motor axial flux BLDC ini digunakan konfigurasi belitan sebagai berikut :

A a B b C c A a B b C c

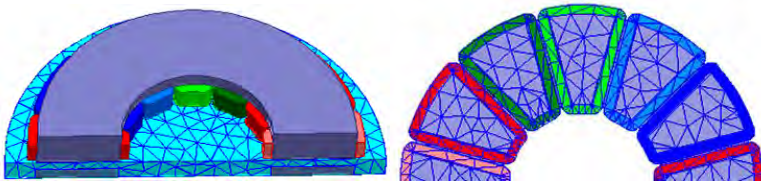
Konfigurasi ini dipilih dengan tujuan untuk memaksimalkan persebaran medan dan juga karena disesuaikan dengan jumlah kutub pada rotor motor *axial flux* BLDC.



Gambar 3.19. Arah eksitasi : (a) fasa A, (b) fasa a, (c) fasa B, (a) fasa b', (e) fasa C, (f) fasa c

3.4.4. Penentuan *Meshing*

Meshing pada proses pemodelan merupakan bagian yang berhubungan langsung dengan proses simulasi menggunakan metode *finite element*. Pada proses *meshing* dilakukan penentuan luasan permukaan hitung dari tiap-tiap bagian motor, yang nantinya luasan tersebut akan digunakan pada proses perhitungan parameter menggunakan metode *finite element*. Semakin kecil luasannya akan dihasilkan perhitungan yang semakin akurat.



Gambar 3.20. Meshing pada motor *axial flux* BLDC

3.4.5. Solution Setup

Pada proses ini dilakukan penentuan penyelesaian yang akan digunakan. Pada simulasi motor *axial flux* BLDC digunakan jenis penyelesaian transient, karena motor *axial flux* BLDC berhubungan dengan medan yang berputar dan eksitasi. Pada proses ini juga dilakukan penentuan waktu perhitungan dan rentang waktu tiap perhitungannya.

3.5. Simulasi Motor *Axial Flux* BLDC Pada *Software* Ansys Maxwell

Dalam simulasi yang dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter kelistrikan pada motor *Axial Flux* BLDC digunakan metode *finite element* untuk menghitung setiap luasan bidang dari model motor sehingga didapatkan nilai keseluruhan dari parameter yang dicari pada motor tersebut. Dalam metode *finite element* tersebut digunakan tipe analisa *transient* untuk mendapatkan parameter-parameter kelistrikan pada motor.

3.5.1. Metode Analisis *Transient*

Simulator *transient* menghitung besarnya medan magnet dengan domain waktu dalam bentuk 2 dimensi atau 3 dimensi. Sumber medan magnetnya dapat berupa:

- Variasi arus yang bergerak maupun yang tidak bergerak
- Permanen magnet dan/atau coil yang bergerak dan tidak bergerak
- Hubungan rangkaian eksternal yang bergerak maupun tidak bergerak

Jumlah yang medan transien simulator pemecahkan adalah medan magnet, H , dan distribusi arus J , kerapatan fluks magnetik, B , secara otomatis dihitung dari H -medan. Turunannya adalah gaya, torsi, energi, kecepatan, posisi, flux linkage pada lilitan, and tegangan terinduksi pada lilitan akan dihitung dengan melihat dasar persamaan medannya.

3.5.2. Analisis *Transient* 3D

Dalam analisis transient 3D (domain waktu), metode pemecahan menggunakan persamaan $T - \Omega$. Dalam analisa ini gerakan (translasi atau silindris / rotasi non-silindris) diperbolehkan, eksitasi - arus dan / atau tegangan - dapat diasumsikan dengan bentuk sembarang sebagai fungsi waktu, ketergantungan dengan kurva non-linier BH dari material juga diperbolehkan. Dukungan pada eksitasi tegangan untuk sebuah lilitan memiliki konsekuensi bahwa arus yang mengalir adalah tidak diketahui, maka persamaannya akan dirubah agar membuat Maxwell dapat memperhitungkan sumber medan yang disebabkan oleh arus yang tidak diketahui. Pada kasus seperti ini konduktor solid akan diperhitungkan pula efek eddy-nya, sedangkan pada konduktor lilitan akan diabaikan efek eddy-nya (efek skin & proximity). Maxwell menggunakan konvensi tertentu dan menggunakan sistem koordinat tetap untuk persamaan Maxwell untuk bagian model yang bergerak dan bagian yang stasioner. Dengan demikian istilah gerak benar-benar dihilangkan untuk jenis gerak translasi sedangkan untuk jenis gerak rotasi persamaan sederhana didapatkan dengan menggunakan sistem koordinat silindris dengan sumbu z sejajar dengan sumbu rotasi yang sebenarnya.

Perhitungan yang digunakan pada modul transien juga memperbolehkan batasan *Master-Slave* dan arus eddy yang terinduksi di bagian manapun dari model, bahkan dapat didefinisikan di bagian yang stasioner dan juga di bagian yang bergerak dari model. Persamaan mekanik yang terpasang pada bagian pejal dari komponen yang bergerak dapat diformulasikan secara kompleks dengan sirkuit elektris yang terkopel dengan bagian *finite element* atau juga terkopel dengan elemen mekanik kapanpun fenomena transien mekanik dimasukkan oleh pengguna pada bagian solusinya. Pada kasus ini gaya/torsi elektromagnetik diperhitungkan dengan menggunakan pendekatan *Virtual Work*. Untuk tipe transien dari analisa medan elektromagnet (dengan atau tidak dengan gerakan) pengguna harus membuat mesh yang dapat “menangkap” semua fenomena fisika yang terjadi seperti efek skin dan

proximity, jika hadir dalam medan yang dihasilkan. Berikut ini persamaan Maxwell yang digunakan dalam aplikasi perhitungan transien (frekwensi rendah):

$$\Omega \nabla \times H = \sigma(E) \quad (3.17)$$

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.18)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.19)$$

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan persamaan berikut :

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (3.20)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.21)$$

Persamaan medan terkopel dengan persamaan sirkuit baik untuk konduktor solid maupun lilitan disebabkan karena, pada kasus suplai voltase, arus tidak diketahui. Untuk kasus tegangan yang diberikan ke konduktor solid, berikut persamaan yang digunakan untuk mencari *ohmic drop* terhadap loop konduktor yang ke-i :

$$V_{Ri} = \int_{R_{C(i)}} \iint J_{0i}(E + v \times B) dR \quad (3.22)$$

J_{0i} merepresentasikan densitas arus dan tegangan yang terinduksi dapat diturunkan dari persamaan berikut:

$$e_{i_{R_{C(i)}}} = - \iiint H_i \cdot B dR \quad (3.23)$$

Integrasi dilakukan pada seluruh bagian konduktor. Untuk non-linieritas yang terjadi, Newton-Raphson klasik digunakan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

DESAIN DAN PERENCANAAN MOTOR *AXIAL FLUX* BLDC

3.1. Dasar Perhitungan *Axial Flux* BLDC dengan Sumber Eksitasi DC Gelombang Persegi

Pada sistem eksitasi menggunakan tipe gelombang eksitasi persegi, setiap interval komutasinya selalu terdapat 2 fasa yang tereksitasi, sehingga dapat menggunakan dasar perhitungan daya keluaran motor *axial flux* BLDC sebagai berikut:

$$P = T \omega_m = 2 E_{ph} I_{ph} \Rightarrow T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{2 E_{ph} I_{ph}}{\omega_m} \quad (3.1)$$

Keterangan :

E_{ph} = Tegangan Back emf tiap fasa

I_{ph} = Arus terpakai

ω_m = Kecepatan motor

T = Torsi mekanis

Untuk mencari nilai tegangan back emf dapat dilakukan melalui persamaan flux linkage sebagai berikut :

$$E_{ph} = -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\lambda}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} = -w_e \frac{d\lambda}{d\theta} \quad (3.2)$$

$$\lambda = N_{ph} \ g \quad (3.3)$$

$$g = B_g A_g = B_g \frac{\pi(R_o^2 - R_i^2)}{P} \frac{\theta_m}{\pi} \quad (3.4)$$

$$E_{ph} = \frac{P}{2} w_m \frac{2N_{ph}}{\theta_m} g = \frac{P}{2} w_m \frac{2N_{ph}}{\theta_m} B_g \frac{\pi(R_o^2 - R_i^2)}{P} \quad (3.5)$$

$$K_r = \frac{R_i}{R_o} \quad (3.6)$$

$$E_{ph} = N_{ph} B_g R_o^2 (1 - K_r^2) w_m \quad (3.7)$$

Dari persamaan di atas didapatkan persamaan torsi sebagai berikut :

$$T = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \pi B_g q_i R_o^3 K_r (1 - K_r^2) \quad (3.8)$$

Keterangan :

T = Torsi output motor AF BLDC (Nm)

B_g = Kerapatan fluks pada airgap (Tesla)

q_i = Loading Value (Aturn/m)

R_o = Jari-jari lingkaran luar (mm)

K_r = perbandingan Jari-jari dalam dan luar

3.2. Penentuan Spesifikasi Motor

Untuk merancang sebuah motor *axial flux brushless* DC Motor, langkah pertama adalah menentukan parameter motor sebagai target yang ingin dicapai. Berikut parameter motor yang akan dibuat :

- Daya = 25000 Watt
- Tegangan operasional = 400 Volt
- Jumlah phasa = 3
- Faktor daya (estimasi) = 0,966
- Efisiensi (estimasi) = 0,8

Dari data target di atas diperoleh kebutuhan spesifikasi pendukungnya, baik secara mekanik maupun elektrik.

3.2.1 Perhitungan Kebutuhan Arus

Secara elektrik kenaikan daya beban akan sebanding dengan kenaikan arus listrik (tegangan tetap). Nilai faktor daya ($\cos \theta$) adalah estimasi awal yaitu 0,966 berdasarkan grafik *Combination Of Numbers Slot And Pole With Balanced Concentration Winding* kemudian nilai efisiensi η juga harus diestimasi terlebih dahulu yaitu dengan nilai 0,8. Sehingga arus yang dibutuhkan jika dihubungkan bintang adalah sesuai perhitungan berikut.

Tabel 3.1. *Combination Of Numbers Slot And Pole With Balanced Concentration Winding*

S \ P	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
3	0,866	0,866		0,866	0,866		0,866	0,866		0,866
6		0,866		0,866	0,866		0,866	0,866		0,866
9			0,866	0,945	0,945	0,866	0,945	0,945		0,945
12				0,866	0,966		0,966	0,966		0,866
15					0,866		0,866	0,866		0,866
18						0,866	0,945	0,945		0,945
21							0,866	0,932		0,953
24								0,866		0,966

$$I = \frac{25000}{3 \times 161,31 \times 0,8 \times 0,966} = 66,848 \text{ A}$$

Apabila sudah diketahui arus yang diperkirakan mengalir ke stator maka dapat ditentukan ukuran kawat tembaga yang akan digunakan dalam belitan stator. Untuk arus 81,3802 A dengan menggunakan desain belitan stator 4 kutub dan dirangkai secara paralel maka tiap belitan akan merasakan arus sebesar :

$$66,848 \text{ A} : 4 = 16,712 \text{ A}$$

Sehingga dapat digunakan kawat berlaminasi standart *American Wire Gauge* (AWG) yaitu kawat tembaga berlaminasi dengan ukuran diameter 1,62 mm.

3.2.2 Perhitungan *Loading Value*

Perhitungan *loading value* pada motor AF BLDC dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$qi = \frac{3 N_{ph} I_{rms}}{\pi D_i} \quad (3.9)$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat N_{ph} , Jumlah lilitan ditiap fasanya, I_{rms} adalah arus yang mengalir ditiap belitan dan D_i adalah nilai diameter konduktor. Dari persamaan di atas dengan mengatur jumlah lilitan

sebesar $N_{ph} = 34$, maka nilai loading value dapat dihitung, sebagai berikut :

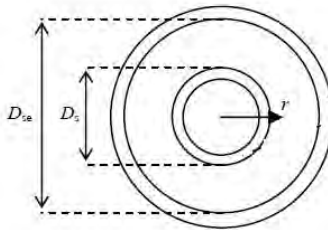
$$q_i = \frac{3 (34) (16,712)}{\pi (1,62 \times 10^{-3})}$$

$$q_i = \frac{1704,62}{5,089 \times 10^{-3}}$$

$$q_i = 334,96 \text{ kAturn/m}$$

3.2.3 Perhitungan Jari-jari Motor

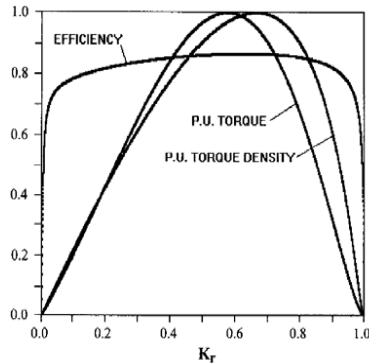
Untuk menyusun sebuah mesin listrik harus ditentukan perkiraan dimensi/ukuran dari beberapa bagian mesin tersebut sebagai acuan untuk perhitungan selanjutnya. Kebutuhan dimensi untuk motor fluks aksial berbeda dengan motor induksi (motor induksi radial fluks) yaitu disesuaikan dengan bentuknya. Seperti pada gambar di bawah ini yang menunjukkan penampang stator ataupun rotor tanpa slot dari AFIM. Parameter utama yang harus ditentukan adalah luas permukaan efektif dari motor yang menghasilkan gaya/torsi, yaitu permukaan di antara diameter D_{se} dan D_e .



Gambar 3.1. Penampang Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Campbell (1974) disebutkan bahwa untuk motor induksi aksial fluks perbandingan antara D_e dengan D_{se} agar torsi yang dihasilkan optimal adalah diantara 0,45 – 0,65. Rasio perbandingan ini disebut dengan K_d . Sebagai awal acuan ukuran harus ditentukan salah satu antara D_s atau D_{se} . Untuk membatasi luas

permukaan maka ditentukan diameter terluar (D_{se}) adalah 22 cm atau 0,22 m dan diameter dalam 10,45 cm atau 0,10 m.



Gambar 3.2. Kurva efisiensi Vs perbandingan diameter motor

Dengan demikian nilai D_s diperoleh dari :

$$Kd = \frac{D_s}{D_{se}} = 0,475$$

$$D_s = 0,475 \times 220 = 104.5\text{mm}$$

Maka diperoleh :

Rin (jari jari dalam)	$= 0,5 \times 104.5$	$= 52,25 \text{ mm}$
Rout (jari jari luar)	$= 0,5 \times 220$	$= 110 \text{ mm}$
Panjang core (l_e)	$= 110 - 52,25$	$= 57,75 \text{ mm}$
R_{ave} (jari jari rata rata)	$= \sqrt{Rout \cdot Rin}$	$= \sqrt{52,25 \times 110}$
		$= 75,81 \text{ mm}$

3.2.4 Penentuan Nilai Torsi

Dalam perancangan *prototype* motor AF BLDC 25 kW, penentuan nilai torsi mengacu pada data rata-rata kebutuhan torsi yang terdapat pada mobil listrik komersil yang ada di pasaran. Pada table 3.2 memperlihatkan data daya keluaran dan torsi maksimum dari beberapa merek mobil listrik komersial. Dari data di bawah dipilih nilai torsi maksimum sebesar 100 Nm untuk motor AF BLDC 25 kW.

Tabel 3.2. Perbandingan daya output dan torsi pada mobil listrik komersial

No	Merek	Output Power (kW)	Max Torque (Nm)
1	Toyota RAV 4 EV	115	295,56
2	Mazda DEMIO EV	75	150
3	Honda FIT EV 2014	75	189
4	BMW i 3	125	250
5	Mercedes-Benz B Class	132	340,31
6	Ford Focus Electric 2014	107	250
7	FIAT 500e	83	200

Sehingga dengan persamaan :

$$\omega = \frac{P_{out}}{T} \quad (3.10)$$

Didapatkan nilai kecepatan putar motor sebagai berikut,

$$\omega = \frac{25000}{100}$$

$$\omega = 250 \text{ rad/s} = 2387,4 \text{ rpm}$$

3.2.5 Penentuan Air Gap

Untuk menentukan celah udara yang tepat dalam mesin AF BLDC harus disesuaikan dengan celah udara yang diperlukan untuk rumah lilitan (*Stator Shoe*). Daerah konduktor yang diperlukan pada permukaan bagian dalam (A_{tcon}) dari motor AF stator didefinisikan dalam persamaan berikut :

$$A_{tCon} = \frac{3 N_{ph} I_{RMS}}{J} \quad (3.11)$$

$$A_{tCon} = \frac{3 N_{ph} I_{RMS}}{J K_{cu}} \quad (3.12)$$

J adalah kerapatan arus dan K_{CU} adalah Faktor Pengisian. Luas area yang tersedia di diameter bagian dalam motor AF dinyatakan dalam dimensi fisik pada Persamaan berikut :

$$A_{tCon} = I_c(2\pi R_i) \quad (3.13)$$

$$q_i = \frac{3 N_{ph} I_{RMS}}{\pi D_i} \quad (3.14)$$

$$N_{ph} I_{RMS} = \frac{q_i \pi D_i}{3} \quad (3.15)$$

Sehingga dari persamaan-persamaan di atas didapatkan rumus untuk memperhitungkan ketebalan rumah belitan (*Stator Shoe*) adalah sebagai berikut :

$$l_c = \frac{q_i}{3J K_{cu}} \quad (3.16)$$

Kerapatan arus dipilih sebesar $7A / mm^2$ dan perlu perhatikan bahwa hanya dalam periode percepatan kerapatan arus ini ada. Faktor pengisian konduktor dipilih sebesar 0,8 (karena distribusi di setiap konduktor linear). Maka dari data tersebut didapatkan nilai ketebalan *housing* belitan sebesar :

$$l_c = \frac{334,96}{3 \times 7 \times 0,8}$$

$$l_c = 19,93 \text{ mm}$$

Pembebanan listrik juga memiliki peran penting dalam menentukan celah udara. Celah udara yang lebih besar memerlukan magnet yang lebih tebal dan akibatnya berat motor meningkat. Maka dari itu dengan memperhatikan kuat medan yang dapat dihasilkan antar air gap, dipilih jarak air gap sebesar 1 mm.

3.2.6 Perhitungan Nilai Kerapatan Flux di Air Gap

Dari parameter-parameter di atas dapat dihitung besarnya nilai kerapatan flux yang terjadi pada air gap. Maka Nilai kerapatan fluxnya adalah sebagai berikut :

$$T = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \pi B_g 334,96 \times 10^3 (0,165)^3 0,65 (1 - 0,65^2)$$

$$B_g = \frac{100 \sqrt{3}}{2\sqrt{2} \pi 334,96 \times 10^3 (165)^3 0,65 (1 - 0,65^2)}$$

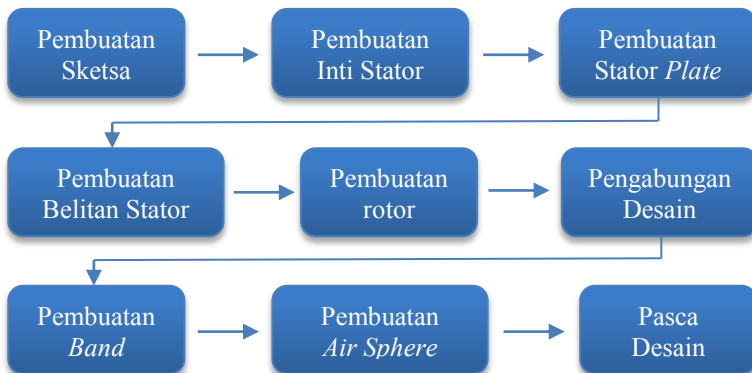
$$B_g = \frac{173,205}{8,8812 (334,96 \times 10^3) (4,492 \times 10^{-3}) (0,3753)}$$

$$B_g = \frac{173,205}{5011,12} = 3,4 \times 10^{-2} \text{ T}$$

Sehingga dari sana parameter-parameter desain perancangan AF BLDC didapatkan, dan dapat dilalukan proses desain.

3.3. Desain Motor *Axial Flux* BLDC Pada *Software Solidwork*

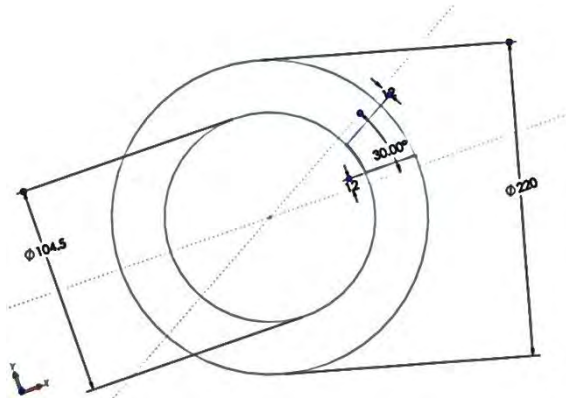
Pada tugas akhir ini sistem pemodelan fisik motor *axial flux* BLDC dilakukan dengan menggunakan *software* Solidwork. Solidwork merupakan perangkat lunak yang mampu digunakan sebagai perangkat lunak desain grafis dan juga simulasi *finite element* untuk melihat karakteristik dari suatu model desain. Pada pembuatan desain model menggunakan Solidwork terdapat beberapa tahap pemodelan. Untuk pemodelan motor *axial flux* BLDC ini sendiri terdapat beberapa tahap pemodelan, diantaranya seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Sistematika pemodelan motor menggunakan Solidwork

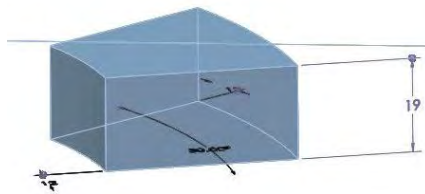
3.3.1 Pembuatan Desain Stator

Awal pembuatan desain motor axial flux BLDC dengan menggunakan *software* Solidwork adalah melalui jendela *assembly*, pada bagian ini, dimulai dengan pembuatan sketsa motor dengan menentukan besaran pada motor. Pada desain awal sketsa motor *axial* dilakukan proses desain terhadap stator motor.

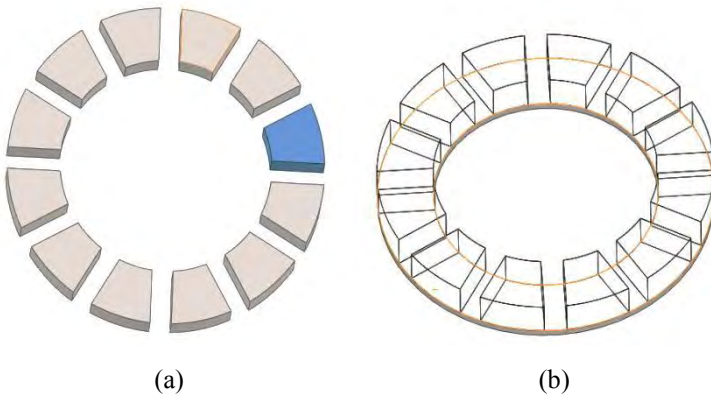


Gambar 3.4. Sketsa stator motor *axial flux* BLDC

Sketsa awal stator digambar untuk membuat pola inti stator berupa potongan bidang di antara 2 lingkaran. Setelah melakukan sketsa pada inti stator, potongan gambar 2 dimensi stator di ubah kedalam bentuk 3 dimensi melalui fitur *extrude*. Setelah desain 3 dimensi terbentuk dilakukan proses pengulangan pola melalui fungsi *circular pattern*, sehingga nantinya akan terbentuk pola inti stator berulang membentuk pola lingkaran.



Gambar 3.5. Desain inti stator

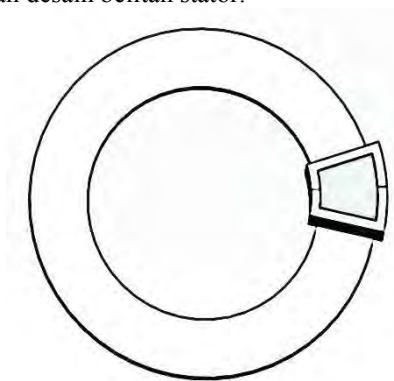


Gambar 3.6. (a) Desain inti stator, (b) Desain stator *plate*

Proses dilanjutkan dengan menggambar *stator plate* (dasar stator), prosesnya membuat desain lingkaran belakang motor tepat pada bagian bawah inti stator dan kemudian membuat desain 3 dimensinya. Setelah itu, maka desain stator plate dan inti stator dapat disatukan.

3.3.2 Pembuatan Belitan Stator

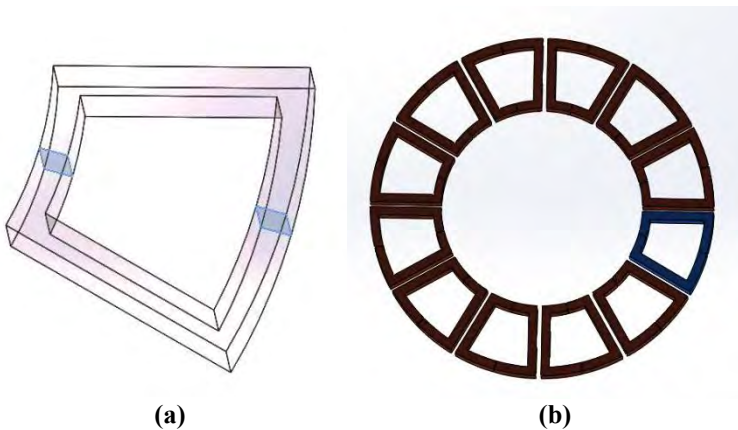
Proses desain berikutnya adalah mendesain belitan stator, berikut ini adalah tampilan desain belitan stator.



Gambar 3.7. Desain belitan stator

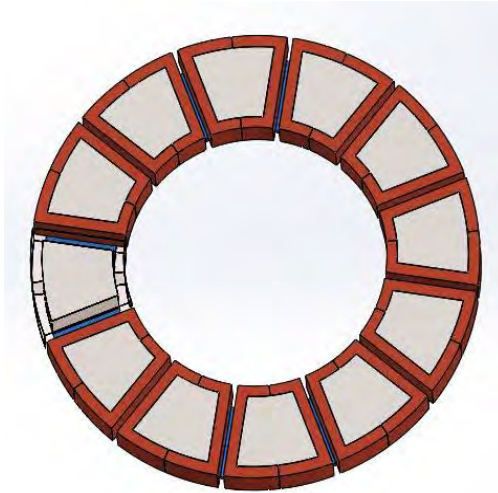
Proses desain dimulai dengan membuat sketsa tepat di atas stator plate dan diantara inti stator. Belitan stator didesain untuk mengelilingi inti stator. Setelah sketsa 2 dimensi terbentuk dan diubah kedalam bentuk 3 dimensi, desain dipastikan untuk tidak ada gambar yang saling bersilangan.

Setelah membuat desain belitan stator, proses selanjutnya adalah melakukan pemotongan bagian belitan menjadi dua bagian dengan fungsi *Split*. Hal ini memiliki tujuan sebagai permukaan masukan dan keluaran arus saat desain ini nantinya dijalankan untuk mengalirkan arus pada motor.



Gambar 3.8. (a) Desain *split* bagian pada belitan stator, (b) *Circular Pattern* belitan stator

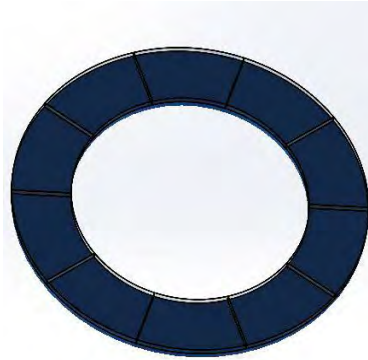
Setelah membagi belitan dilakukan pengulangan pola belitan seperti pada desain inti stator sebelumnya, sehingga dihasilkan desain belitan stator sejumlah banyaknya inti stator, dengan desain mengelilingi inti stator. Setelah sesuai, maka desain belitan, inti stator dan stator *plate* dapat digabungkan. Pada gambar 3.9 memperlihatkan desain lengkap stator motor *axial flux* BLDC yang memiliki 12 inti stator.



Gambar 3.9. Desain stator lengkap motor *axial flux* BLDC

3.3.3 Pembuatan Desain Rotor

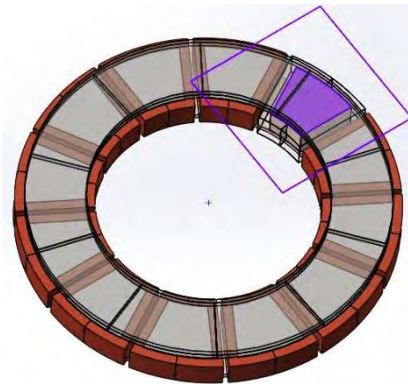
Proses desain selanjutnya menggambar bagian rotor motor *axial flux* BLDC. Dalam menggambar rotor motor *axial flux* BLDC terdapat 2 bagian utama yang harus di desain yaitu rotor *plate* (dasar rotor), dan magnet permanen motor. Proses desain dimulai dengan membuat desain 2 dimensi dari rotor *plate*, dan kemudian mengubahnya ke bentuk 3 dimensi dengan mengatur tinggi ketebalan stator *plate* tersebut. Proses berikutnya menggambarkan permanen magnet yang digunakan pada rotor motor *axial flux* BLDC, proses desainnya dimulai dengan mendefinisikan jumlah kutub magnet yang ingin dibuat, kemudian melakukan sketsa 2 dimensi sebuah magnet. Sketsa tersebut diubah kedalam bentuk 3 dimensi dan mengatur jumlah ketebalan dari magnet tersebut. Setelah magnet terbentuk dilakukan pengulangan pola untuk beberapa desain magnet sejumlah magnet yang diinginkan. Setelah terbentuk maka desain stator plate dan magnet permanen dapat digabungkan.



Gambar 3.10. Desain rotor motor *axial flux* BLDC

3.3.4 Penggabungan Desain

Penggabungan desain (*Design mate's*) pada sebuah pemodelan motor untuk tujuan simulasi berbasis *finite element* adalah hal yang sangat penting. Hal ini karena saat melakukan penggabungan ada beberapa parameter yang harus ditentukan. Proses penggabungan desain bertujuan untuk mensinkronkan desain motor antara bagian stator dan rotornya, hal ini dilakukan karena pada saat proses simulasi, harus ditentukan bagian model mana yang bergerak dan bagian mana yang tetap.

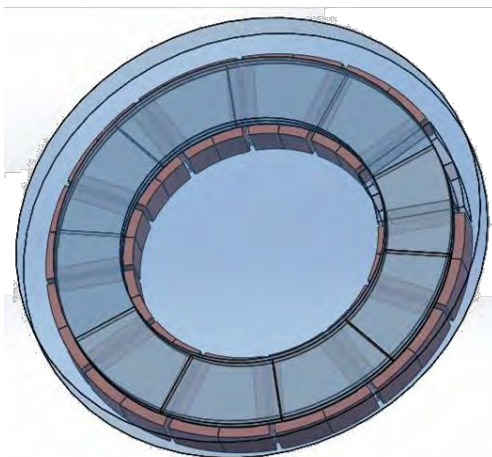


Gambar 3.11. Penggabungan desain motor

Proses penggabungan ini dimulai dengan memilih luasan bidang mana antar stator dan rotor yang akan digabungkan. Dalam hal ini permukaan inti stator akan sejajar dengan magnet permanen. Setelah menentukan permukaan bidang, dilanjutkan dengan mengatur jarak antar permukaan. Hal ini juga sebagai media penentuan panjang air gap dari motor. Proses ini juga nantinya akan mendefinisikan arah putaran dari rotor, dan bidang – bidang yang bersinggungan antara kedua model.

3.3.5 Desain Luasan *Vacuum*

Desain luasan *vacuum* merupakan salah satu hal yang penting dari pemodelan motor untuk simulasi, karena luasan ini akan mendefinisikan seberapa luas bidang sapuan angin yang akan dikenakan pada bagian rotor dan keseluruhan desain itu sendiri. Terdapat dua desain yang harus dibuat yaitu desain *Band* dan *Air Sphere*. Proses desain, untuk *band*, dengan membuat suatu luasan volume sepanjang rotor dan mendefinisikan materialnya berupa udara.



Gambar 3.12. Desain *band* motor *axial flux* BLDC

Proses desain *air sphere* dilakukan dengan membuat bidang luasan volume yang besar untuk menyelimuti seluruh model motor *axial flux* BLDC.

BAB 4

HASIL PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULASI

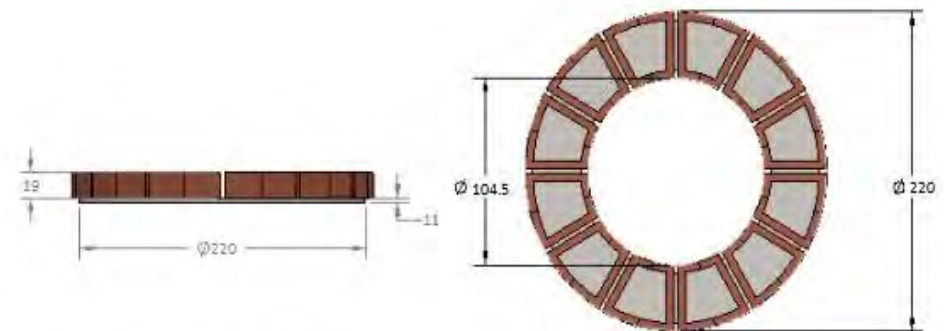
Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil desain pemodelan motor *axial flux* BLDC serta analisa data hasil simulasi untuk mendapatkan parameter-parameter pada motor *axial flux* BLDC tersebut.

4.1 Hasil Desain Pemodelan Motor *Axial Flux* BLDC

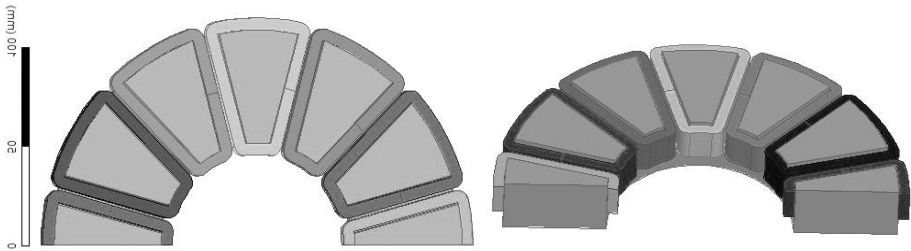
Pemodelan dan desain motor *axial flux* BLDC pada tugas akhir ini menggunakan 2 jenis perangkat lunak pemodelan yaitu Solidwork dan Ansys Maxwell. Dua jenis perangkat lunak tersebut digunakan dengan tujuan untuk memvalidasi desain motor yang dibuat dan memudahkan dalam proses simulasi untuk mencari parameter-parameter pada motor tersebut. Untuk Desain fisik motor digunakan *software* Solidwork dan untuk desain simulasi digunakan *software* Ansys Maxwell. Berikut ini adalah hasil desain pemodelan serta spesifikasi dari setiap bagian motor *axial flux* BLDC.

4.1.1 Desain dan Spesifikasi Stator

Berikut ini adalah desain stator *motor axial flux* BLDC dengan menggunakan *software* Solidwork dan Ansys Maxwell.



Gambar 4.1. Desain stator motor dengan *software* Solidwork



Gambar 4.2. Desain stator motor dengan *software* Ansys Maxwell

Tabel 4.1 menampilkan data spesifikasi stator dari motor axial flux BLDC yang dirancang.

Tabel 4.1. Data spesifikasi stator

DATA STATOR	
Tipe Motor	<i>Single Sided</i>
Jenis Stator	<i>Sloted stator</i>
Posisi Stator	Atas
Jumlah Slot Stator	12
Diameter Luar Stator (mm)	220
Diameter Dalam Stator (mm)	104,5
Panjang Core Stator	30
Jenis Material Stator	D23_50

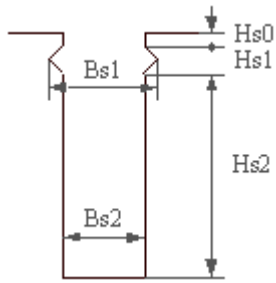
Penggunaan desain stator sesuai dengan spesifikasi di atas didasarkan oleh beberapa pertimbangan. Penggunaan jenis motor *axial flux* BLDC dengan single sided motor didasari karena motor *axial flux* BLDC jenis ini dari segi konstruksi sederhana dan mampu menghasilkan *power to weight* rasio yang baik dengan biaya pembuatan yang relatif murah. Penggunaan *slotted* stator dipilih karena mengacu pada motor *axial flux* BLDC yang telah diproduksi, karena melalui penggunaan *slotted* stator, metode perangkaian motor lebih mudah.

Jumlah slot pada stator dipilih sejumlah 12 didasarkan atas pemilihan jumlah kutub pada rotor yaitu 10. Perbandingan antara jumlah slot stator dan rotor ini sangat penting dalam pemodelan motor *axial flux*

BLDC. Perbandingan 12 slot 10 kutub ini menghasilkan angka rasio perbandingan 1,2, angka ini menunjukan bahwa perbandingan ini baik digunakan untuk implementasi motor komersial. Pemilihan jumlah perbandingan ini didasari atas beberapa hal, diantaranya besarnya *cogging*, besarnya *back-EMF* serta biaya. Perbandingan 12 slot dan 10 kutub ini mampu menghasilkan nilai *cogging* yang rendah dan juga biaya yang rendah, dan nilai *back-EMF* yang relatif rendah pula. Pemilihan diameter luar dan dalam motor didasarkan pada gambar 3.2 yang menghasilkan nilai efisiensi tertinggi.

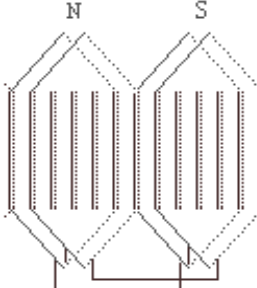
Pada Tabe 4.2 memperlihatkan spesifikasi yang digunakan pada desain slot stator.

Tabel 4.2 Data spesifikasi slot stator

DATA SLOT STATOR	
Desain Slot Stator	
hs0 (mm):	1
hs1 (mm):	0
hs2 (mm):	19
bs1 (mm):	15
bs2 (mm):	15
Stacking Factor	0,95

Desain spesifikasi slot stator disesuaikan dengan kebutuhan jumlah lilitan motor dan luasan dari inti stator. Semakin tepatnya perbandingan luasan yang dibutuhkan oleh belitan dengan luasan slot yang digunakan maka akan mengurangi rugi-rugi secara mekanis, dan juga memaksimalkan luasan inti stator yang berhubungan terhadap besarnya luasan medan yang akan tercipta. Pada tabel 4.3 merupakan spesifikasi dari belitan stator.

Tabel 4.3 Data spesifikasi belitan stator

DATA BELITAN STATOR	
Jumlah Fasa	3
Koneksi Belitan	Y3
Jumlah Cabang Paralel	1
Jumlah Layer Belitan	2
Tipe Belitan	<p><i>Whole-Coiled</i></p> 
Coil Pitch	1
Winding Factor	0,933013
Jumlah Lilitan	34
Jumlah Kawat per Konduktor	1
Lebar kawat (mm)	4,36
Ketebalaan kawat (mm)	1,02
Lebar Lilitan (mm)	14,58
Tinggi Lilitan (mm)	9,12
Jenis Material Konduktor	Tembaga

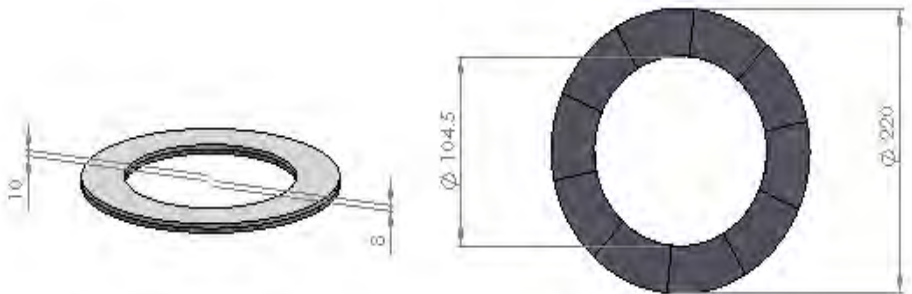
Desain spesifikasi belitan stator dipilih menggunakan 3 fasa, dan dikoneksikan secara wye (Y), hal ini pada motor *axial flux* BLDC akan berpengaruh terhadap nilai arus yang dibutuhkan oleh motor serta berpengaruh terhadap bentuk gelombang *Back-EMF*nya. Jenis belitan yang dipilih adalah tipe *Whole-Coiled* dengan jumlah lilitan sebanyak 34 lilitan, hal ini disesuaikan dengan kebutuhan arus pada motor. Jenis konduktor yang digunakan pada desain motor *axial flux* BLDC ini adalah *rectangular wire*, yang besarnya disesuaikan dengan kebutuhan arus sehingga dipilih konduktor dengan lebar 4,36 mm dan tebal 1,02 mm. Jenis konduktor yang digunakan adalah konduktor tembaga.

4.1.2 Desain dan Spesifikasi Rotor

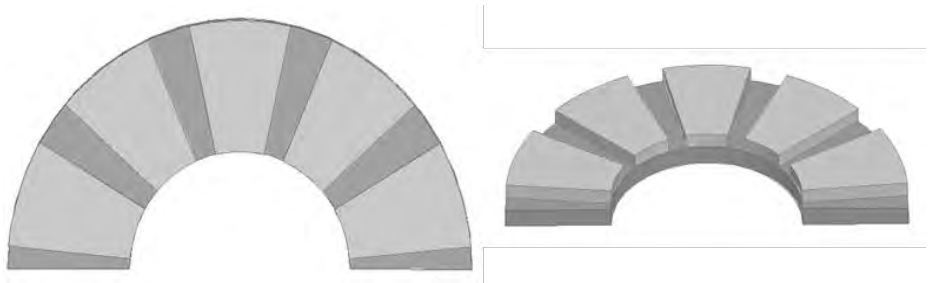
Desain rotor pada motor *axial flux* BLDC ini terdiri dari 2 lapisan yaitu inti rotor dan magnet permanen. Pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 memperlihatkan desain dari rotor motor *axial flux* BLDC ini.

Tabel 4.4 Data spesifikasi stator motor

DATA ROTOR	
Tipe Rotor	AXIAL PM
Posisi Rotor	Dibawah
Jumlah Kutub	10
Diameter Luar Rotor (mm):	220
Diameter Dalam Rotor (mm):	104,5
Panjang Inti Rotor (mm):	10
Stacking Factor Inti Rotor	0,95
Steel Type of Rotor:	D23_50
Panjang Magnet	57,75
Ketebalan Magnet	8



Gambar 4.3. Desain rotor motor dengan software Solidwork

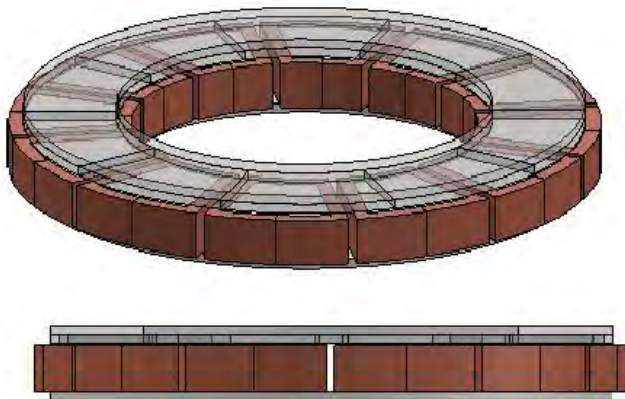


Gambar 4.4. Desain rotor motor dengan software Ansys Maxwell

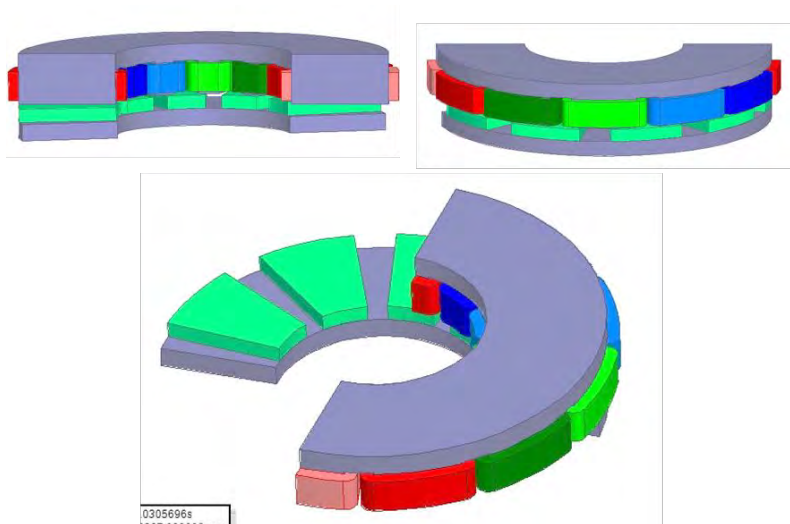
Spesifikasi rotor motor *axial flux* BLDC ini dipilih menggunakan 10 kutub, dengan diameter luar dan dalam menyesuaikan diameter stator, panjang inti statornya 10 mm dan ketebalan magnet sebesar 8 mm. Pada dasarnya pemilihan ketebalan magnet tidak terlalu berpengaruh terhadap kuat medan yang dihasilkan oleh magnet itu. Kuat medan magnet sangat dipengaruhi dari jenis material magnet itu sendiri. Untuk saat ini kekuatan magnet terbesar yang dapat digunakan untuk aplikasi motor listrik yaitu magnet jenis neodymium yang kekuatannya mencapai 1,4 Tesla.

4.1.3 Desain *Assembly*

Berikut ini adalah tampilan *assembly* lengkap dari pemodelan motor axila flux BLDC.



Gambar 4.5. Desain *assembly* motor *axial flux* BLDC menggunakan software Solidwork



Gambar 4.6. Desain *assembly* motor *axial flux* BLDC menggunakan *software* Ansys Maxwell

4.1.4 Desain dan Spesifikasi *Controller* motor

Pada motor axial flux BLDC rangkaian control motor merupakan bagian yang sangat penting yang mengatur jalannya motor tersebut. Berikut ini spesifikasi dan jenis controller yang digunakan pada desain motor axial flux BLDC ini.

Tabel 4.5. Spesifikasi rangkaian control

Data Rangkaian	
Tipe Kontrol	DC
Tegangan sumber (V)	400
lebar Trigger Pulsa (deg):	120
Transistor Drop (V):	0,7
Diode Drop (V):	0,7

Dari gambar rangkain kontrol di atas dapat dilihat bahwa pada dasarnya sistematika rangkaian ini adalah rangkaian inverter yang merubah masukan tegangan dc menjadi ac. Sistematika kerja rangkaian kontrol adalah dengan menerima masukan dari sensor yang dipasangkan pada motor maka rangkaian kontrol akan mengatur periode *Switching* dari saklar untuk dapat menghasilkan besaran arus sesuai dengan orientasi medan yang timbul di stator.

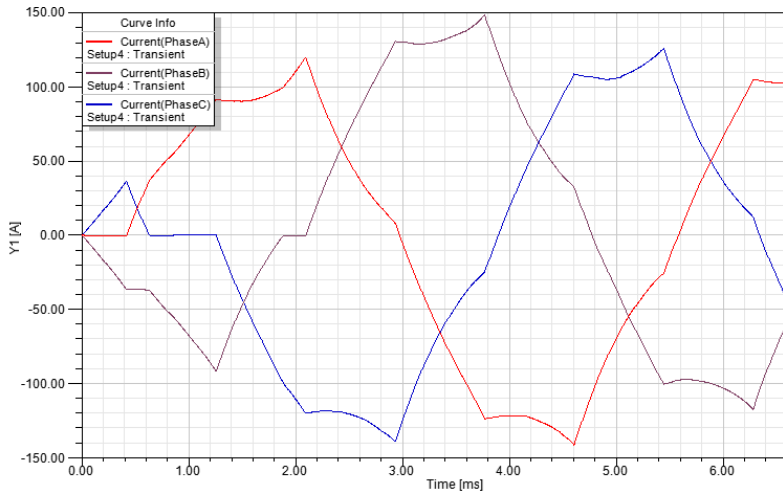
4.2 Analisa Hasil Parameter Simulasi

Dari desain motor *axial flux* BLDC yang telah dimodelkan sebelumnya dilakukan proses simulasi dengan menggunakan *software* Ansys Maxwell melalui metode *finite element*, sehingga didapatkan beberapa outputan parameter yang dicari untuk mengetahui karakteristik dari motor *axial flux* BLDC ini. Berikut ini adalah hasil dan analisa terkait data parameter yang didapat dari simulasi motor *axial flux* BLDC ini.

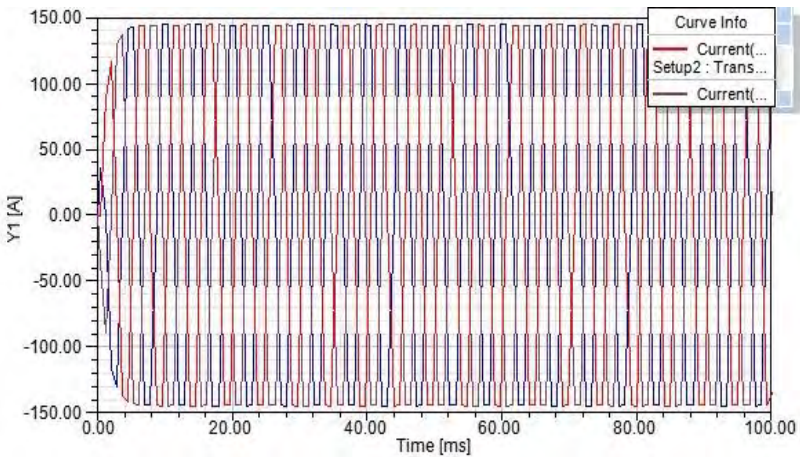
4.2.1 Karakteristik *Input* Motor

Karakteristik *input* motor pada dasarnya terdiri dari besarnya arus masukan, tegangan masukan dan $\cos \alpha$ dari motor tersebut. Simulasi untuk mendapatkan parameter masukan dari motor dilakukan dengan mencari besaran nilai arus dan tegangan yang mengalir pada stator motor. Nilai arus dan tegangan pada motor ini dipengaruhi oleh besarnya sumber yang masuk dari *controller* yang menggunakan sumber 400 Volt dc. Kemudian besarnya tegangan yang keluar dari *controller* akan masuk ke motor, dan kemudian besarnya nilai arus yang mengalir pada motor bergantung dari jumlah belitan yang digunakan untuk menghasilkan besaran medan.

Pada simulasi ini, simulasi dilakukan dengan 2 rentang waktu yaitu selama 6,6 ms dan 100 ms, dengan frekuensi *sampling* yang berbeda, dari hasil simulasi tersebut didapatkan besaran nilai arus sebesar $I_{rms} = 82,47$ A, dengan waktu *steady state* pada $t = 2$ ms. Pada gambar 4.8 dan 4.9 akan memperlihatkan gambar bentuk gelombang arus masukan pada motor *axial flux* BLDC.

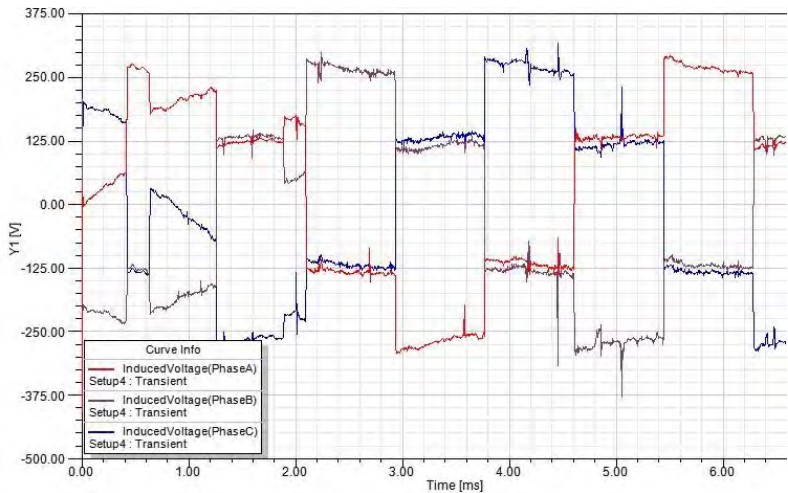


Gambar 4.8. Bentuk gelombang arus untuk t selama 6,6 ms

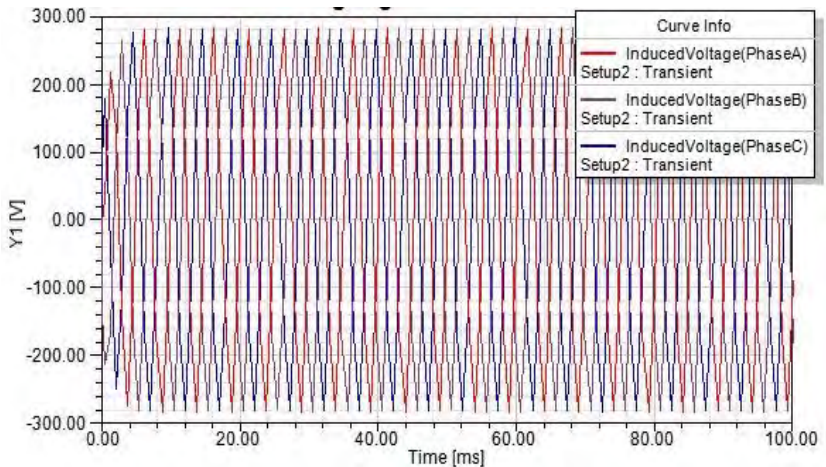


Gambar 4.9. Bentuk gelombang arus untuk t selama 100 ms

Untuk nilai tegangan didapatkan V_{rms} sebesar 162,31 V, dengan waktu *steady state* pada $t = 2$ ms



Gambar 4.10. Bentuk gelombang tegangan untuk t selama 6,6 ms



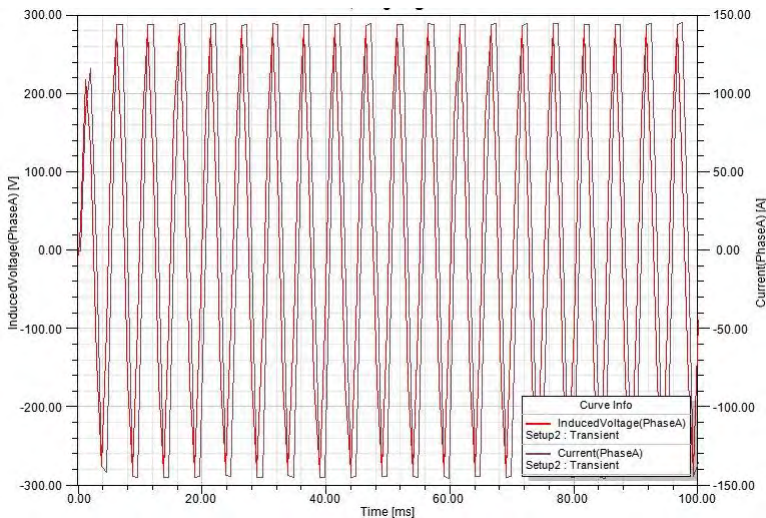
Gambar 4.11. Bentuk gelombang tegangan untuk t selama 100 ms

Dari data diatas dengan membandingkan dengan nilai perhitungan desain awal dengan rating $P_{out} = 25 \text{ kW}$, didapatkan nilai arus yang seharusnya adalah $I_{rms} = 66,84 \text{ A}$, sedangkan pada simulasi ini didapatkan nilai $I_{rms} = 82,47 \text{ A}$. Perbedaan ini disebabkan karena dari

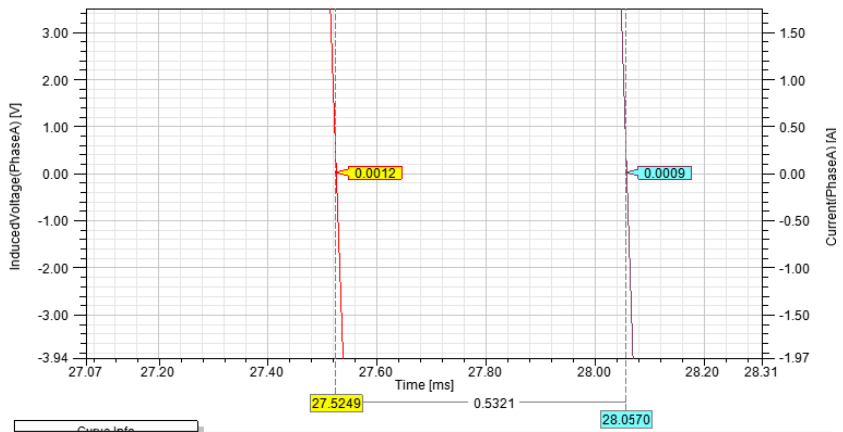
hasil simulasi didapatkan besarnya $P_{out} = 27,307 \text{ kW}$, dan nilai efisiensi serta $\cos \alpha$ baru berubah, dari setingan diperhitungan awal.

Para meter inputan berikutnya adalah nilai $\cos \alpha$, yang tercipta dari perbedaan sudut fasa anantara gelombang tegangan dan arus yang masuk ke motor, dari simulasi yang dilakukan besarnya nilai $\cos \alpha$ dapat dicari dengan menghitung besarnya perbedaan sudut fasa antara arus dan gelombang masukan. Berikut ini merupakan perhitungan nilai $\cos \alpha$ yang didapat dari simulasi motor axial flux BLDC.

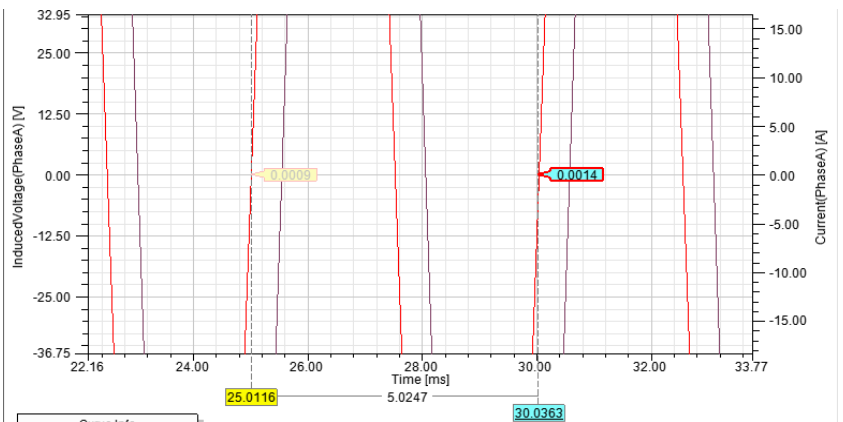
$$\alpha = \frac{t_{(I=0)} - t_{(V=0)}}{T} \times 360^\circ \quad (4.1)$$



Gambar 4.12. Bentuk gelombang tegangan dan arus salah satu fasa motor



Gambar 4.13. Selisih waktu saat $I=0$ dan $V=0$



Gambar 4.14. Periode gelombang

Dari data grafik diatas dapat dicari nilai α sebesar :

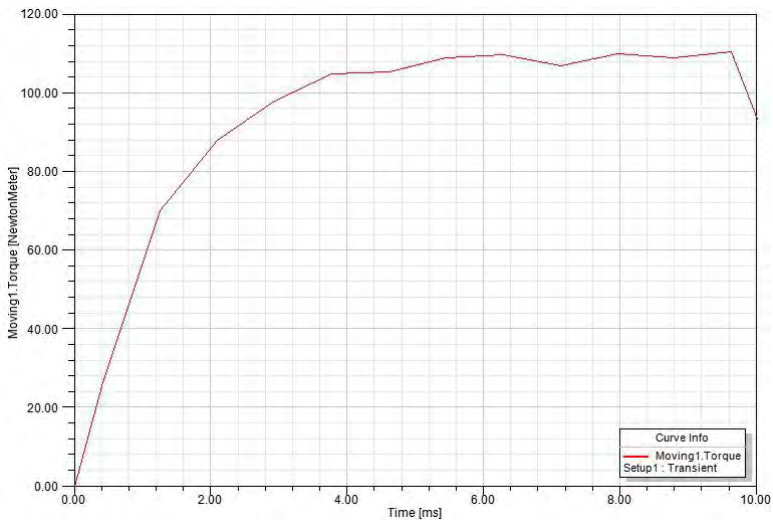
$$\alpha = \frac{0,5321}{5,024} \times 360^\circ = 38,12^\circ$$

Sehingga dari nilai α tersebut didapatkan nilai $\cos \alpha$ sebesar :

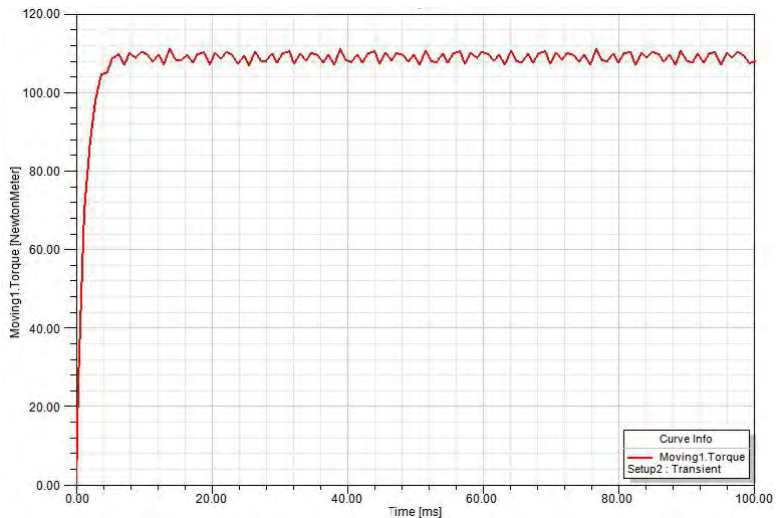
$$\cos 38,12^\circ = 0,78$$

4.2.2 Karakteristik Torsi Kecepatan

Karakteristik Torsi dan Kecepatan pada suatu motor listrik merupakan salah satu parameter utama untuk menghitung kehandalan dari motor tersebut. Pada simulasi motor *axial flux* BLDC ini, sesuai dengan perhitungan sebelumnya digunakan kecepatan referensi 2388 rpm dengan nilai torsi keluaran sebesar 100 Nm. Dari hasil simulasi yang didapat dengan menggunakan 2 kali pengujian dengan rentang waktu $t_1 = 10$ ms dan $t_2 = 100$ ms didapat hasil torsi pada kecepatan 2388 rpm sebesar $T = 109$ Nm. Pada gambar 4.15 dan 4.16 memperlihatkan besarnya nilai torsi ditiap waktunya.



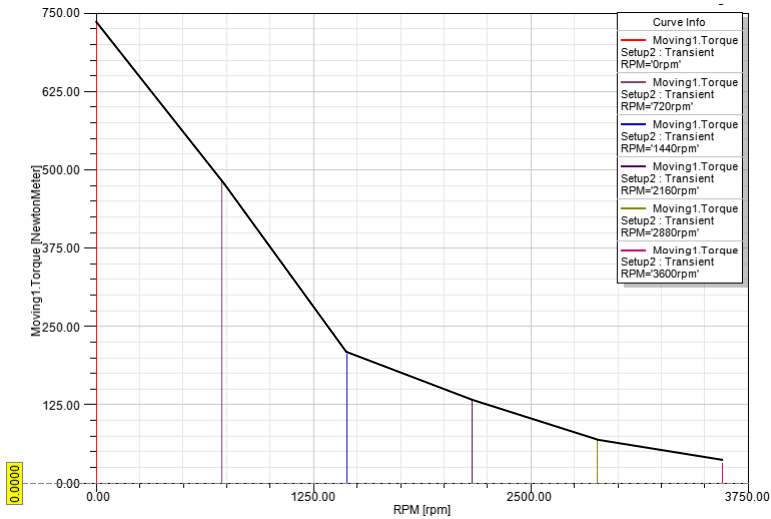
Gambar 4.15. Nilai Torsi motor dengan $n = 2388$ rpm, $t = 10$ ms



Gambar 4.16. Nilai Torsi motor dengan $n = 2388$ rpm, $t = 100$ ms

Dari data di atas terdapat perbedaan 9 Nm torsi dari data perhitungan desain awal yang telah dibuat. Dari data tersebut dapat dihitung nilai daya output motor *axial flux* BLDC tersebut.

Pada simulasi ini juga dihitung secara *parametric* (mengacu pada data referensi) besarnya nilai torsi di nilai kecepatan yang lainnya. Pada gambar 4.17 memperlihatkan grafik torsi-kecepatan dari motor *axial flux* BLDC yang dirancang ini.



Gambar 4.16. Grafik Torsi Vs Kecepatan motor *axial flux* BLDC

4.2.3 Karakteristik Daya Input

Dari nilai perhitungan parameter masukan diatas dapat dihitung besarnya nilai daya masukan yang dibutuhkan oleh motor *axial flux* BLDC ini. Dengan nilai arus dan tegangan seperti tertera dibawah :

$$I_{rms} = 82,47 \text{ A}$$

$$V_{rms} = 162,31 \text{ V}$$

Dengan rumus,

$$P_{in} = 3 V I \cos \alpha \quad (4.2)$$

Didapatkan nilai daya masukan sebesar,

$$P_{in} = 3 \times 162,31 \times 82,47 \times 0,78$$

$$P_{in} = 31,322 \text{ Kw}$$

4.2.4 Karakteristik Daya Output

Dari data torsi dan kecepatan yang didapatkan pada simulasi diatas, dapat dihitung nilai daya output motor yang dihasilkan dari desain motor *axial flux* BLDC ini. Besarnya nilai daya keluaran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$P_{out} = T \omega \quad (4.3)$$

Sehingga dari persamaan diatas dapat dihitung nilai daya keluaran sebesar,

$$P_{out} = 109 \text{ Nm} \times 2388$$

$$P_{out} = 27,307 \text{ Kw}$$

4.2.5. Efisiensi

Nilai efisiensi motor dapat dihitung dengan membandingkan nilai daya keluaran dan daya masukan. Nilai efisiensi dari motor *axial flux* BLDC yang telah didesain ini dihitung dengan persamaan berikut ini,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.4)$$

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan nilai efisiensi motor sebesar,

$$\eta = \frac{27307}{31322} \times 100\%$$

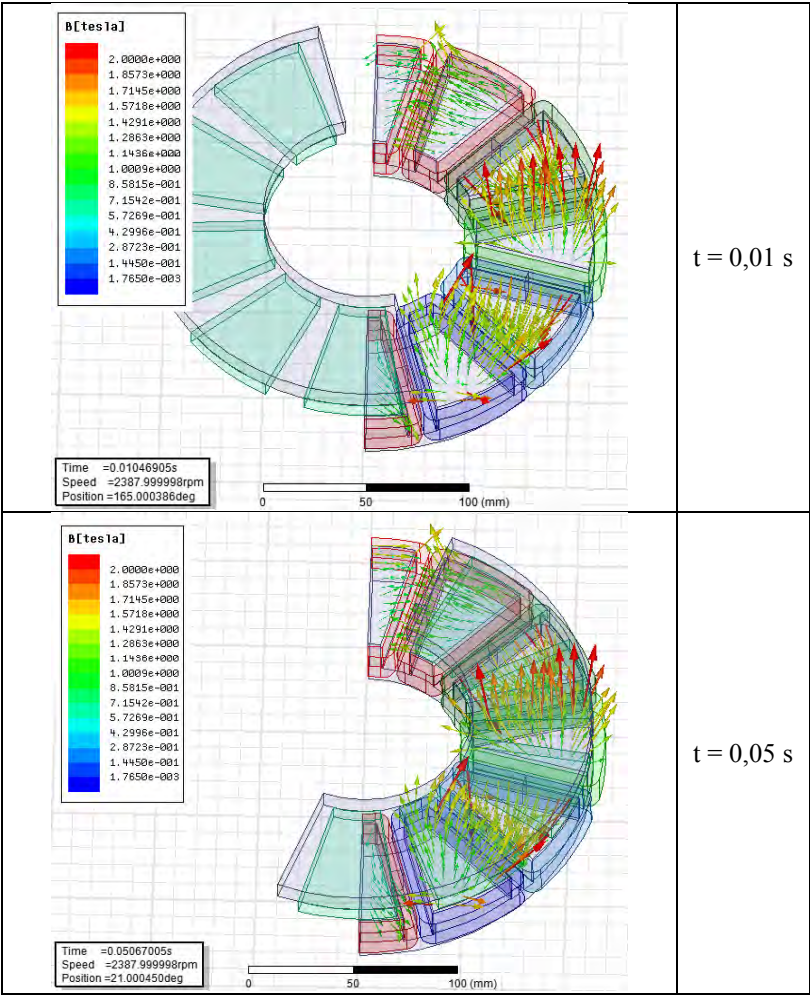
$$\eta = 88,45 \%$$

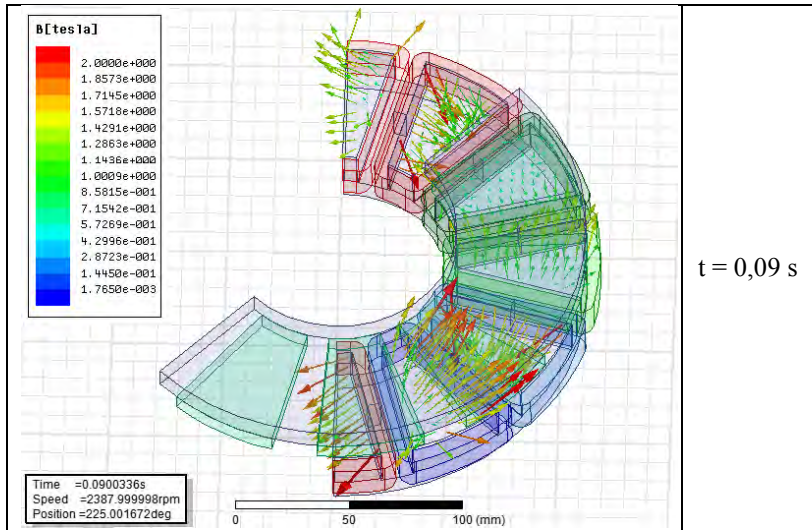
Nilai efisiensi ini besar dipengaruhi akibat rugi-rugi yang terdapat pada motor *axial flux* BLDC. Rugi-rugi pada motor *axial flux* BLDC dikenal cukup besar dibagian *stranded losses*, dengan nilai arus yang besar menghasilkan rugi panas yang cukup besar pada motor *axial flux* BLDC.

4.2.6 Karakteristik Medan Stator

Dari data simulasi didapatkan nilai kerapatan fluks pada stator dengan nilai maksimum sebesar 2,03 Tesla. Dari pengambilan data selama 0,1 s didapatkan bentuk persebaran kerapatan fluks seperti gambar dibawah ini. Gambar dibawah memperlihatkan arah medan dan besarnya nilai kerapatan fluks yang tercipta pada permukaan stator

Tabel 4.6. Karakteristik medan stator



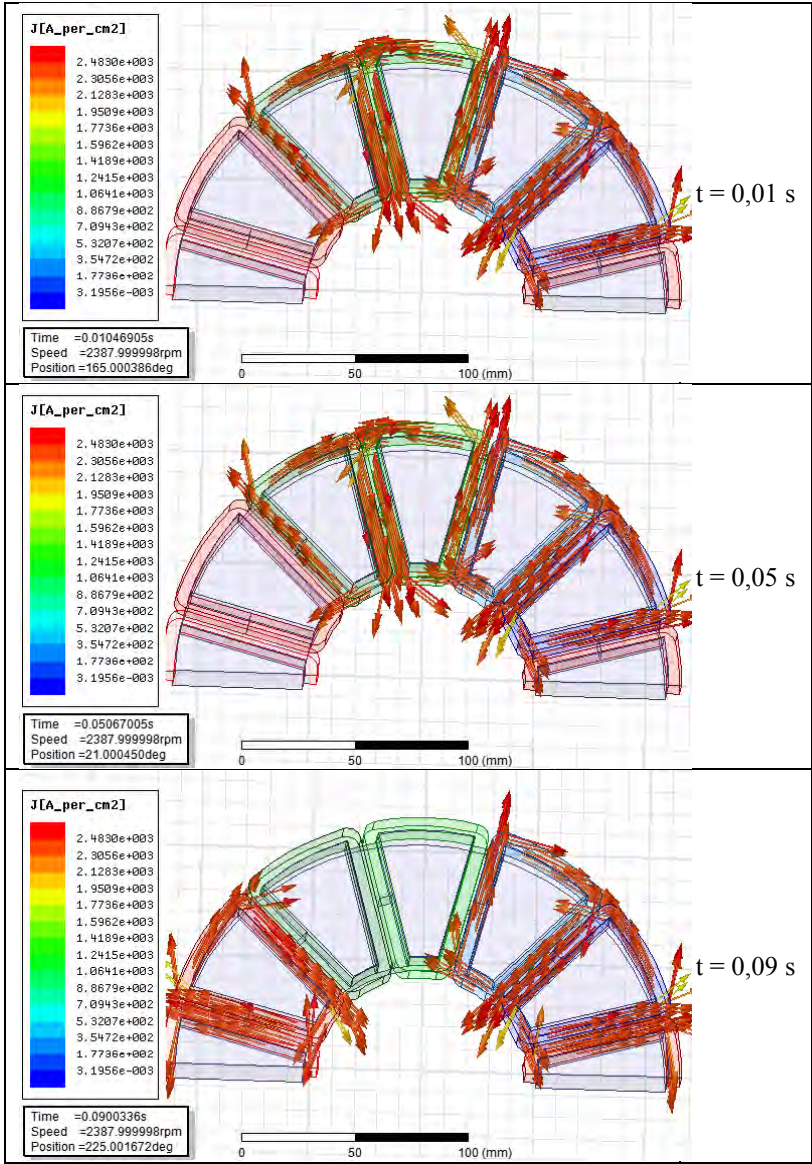


Gambar diatas membuktikan adanya pengaruh antara arus yang mengalir di belitan yang menimbulkan medan dan medan paparan dari magnet pada rotor. Akibat adanya medan pada stator akan menimbulkan gaya tarik maupun gaya tolak pada rotor motor *axial flux* BLDC. Dari data diatas dapat di analisa bahwa pada saat $t = 0,05 \text{ s}$ dan $t = 0,09 \text{ s}$ terlihat jelas terjadi perubahan arah medan dari yang tadinya mengarah kedalam pada $t = 0,05\text{s}$, medanya menjadi mengarah keluar saat $t = 0,09 \text{ s}$, dari sana dapat dilihat kekuatan tarik dan tolak antara medan stator dan magnet permanen.

4.2.7 Karakteristik Aliran Arus Stator

Berikut ini adalah data aliran arus pada belitan stator motor *axial flux* BLDC, pada beberapa cuplikan waktu. Bentuk arah aliran arus tersebut dipengaruhi dari besarnya nilai masukan arus yang diberikan oleh rangkaian kontrol dari motor *axial flux* BLDC. Arah arus tersebut juga dipengaruhi oleh aktivitas sensor yang dipasangkan pada motor yang akan membaca arah orientasi medan dari permanen magnet pada rotor motor. Dari data dibawah akan dilihat arah aliran arus pada stator, sehingga membuktikan terbentuknya putaran pada rotor. Masuknya arus dan besarnya nilai arus yang masuk dipengaruhi dari kuat medan magnet yang terbaca oleh rangkaian sensor dari *controller*.

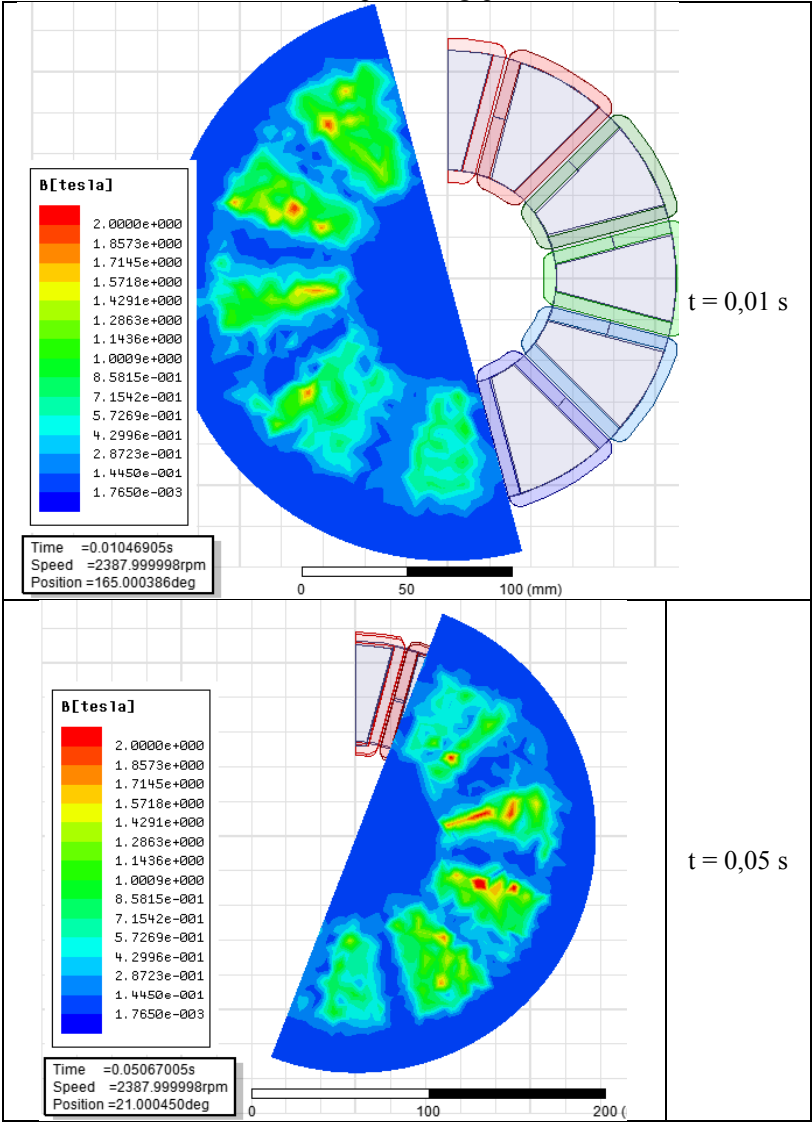
Tabel 4.7. Karakteristik arah aliran arus stator

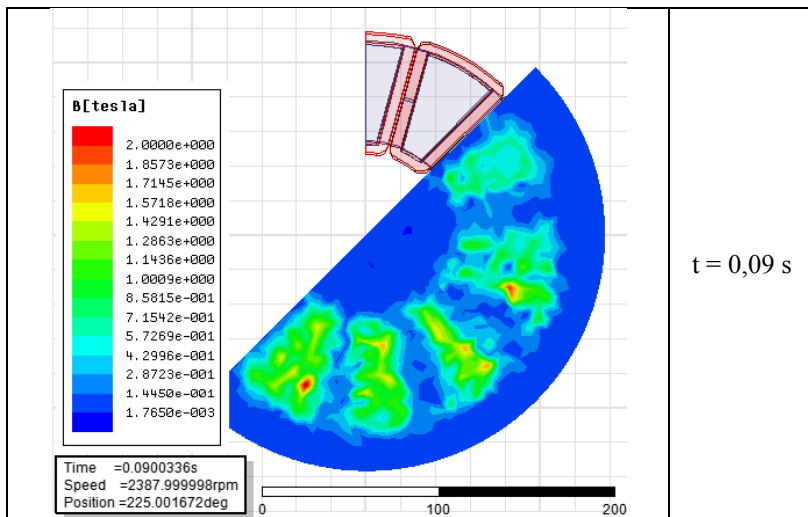


4.2.8 Karakteristik Medan pada Air Gap

Tabel 4.8 memperlihatkan hasil simulasi medan pada air gap.

Tabel 4.8. Karakteristik Medan pada Air gap





Dari data kuat medan pada *air gap* diatas dapat dilihat bahwa terdapat pengaruh dari interaksi antara medan yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor dan medan yang dihasilkan oleh stator. Besarnya medan yang dirasakan pada stator ini bergeser seiring dengan pergeseran rotor.

Selain itu dari data ini juga dapat dilihat bahwa, kuat medan yang terjadi pada stator paling banyak dirasakan pada bagian tepi inti stator, sehingga kurang kuat di bagian dalam inti stator. Hal ini disebabkan karena belitan pada stator paling besar menginduksi hanya pada bagian tepi inti stator.

4.2.9 Losses Motor

Terdapat beberapa rugi-rugi yang mempengaruhi kinerja motor *axial flux* BLDC. Dalam simulasi ini dihitung efek *stranded losses* pada motor *axial flux* BLDC. Pada gambar 4.17 diperlihatkan besarnya *stranded losses* yang timbul pada desain motor. *stranded losses* merupakan rugi-rugi yang ditimbulkan oleh belitan dan menyebabkan panas pada motor. *stranded losses* ini akan berimbas pada motor dengan menurunkan efisiensi pada motor. *stranded losses* bertambah seiring dengan bertambahnya arus yang mengalir pada motor *axial flux* BLDC.



Gambar 4.17. *stranded losses* pada motor

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pemodelan dan simulasi motor *axial flux* BLDC, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Desain motor *axial flux* BLDC yang dirancang memiliki spesifikasi konstruksi dan ukuran sebagai berikut,

Tipe Motor	<i>Single Sided</i>
Jenis Stator	<i>Sloted stator</i>
Diameter Luar (mm)	220
Diameter Dalam (mm)	104.5
Jumlah Slot Stator	12
Panjang Core Stator (mm)	30
Tebal Inti stator (mm)	19
Jumlah Kutub	10
Panjang Inti Rotor (mm):	10
Panjang Magnet	57.75
Ketebalan Magnet	8
Jenis Material inti	D23_50
Jumlah Lilitan	34
Lebar kawat (mm)	4.36
Ketebalaan kawat (mm)	1.02
Jenis Material belitan	Tembaga

2. Dari rancangan motor yang telah dibuat, didapatkan nilai kecepatan rating di 2388 RPM dengan torsi 109 Nm dan daya output sebesar 27,307 Kw. Pada kondisi rating ini didapatkan nilai Arus masukan 82,47 A dengan tegangan yang masuk ke motor sebesar 162,31 V.

3. Desain motor *axial flux* BLDC ini mampu memberikan Efisiensi sebesar 88,45 %. Hal ini disebabkan motor belum dioperasikan pada kecepatan dan torsi optimalnya.

5.2. Saran

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut pada segi pemilihan material dari inti stator, karena material pada inti memegang peranan penting yang menyebabkan besarnya nilai rugi-rugi pada inti.
2. Mengimplementasikan desain motor *axial flux* BLDC ini dengan tujuan validasi dan penyempurnaan metode – metode desain selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yang .Yee-Pien. —*Design and Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles—Part I: Multiobjective Optimal Design and Analysis,*” in *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 40, No. 4, July 2004
- [2] L. Chang, —*Comparison of AC drives for electric vehicles—A report on experts’ opinion survey,*” in *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, Aug. 1994, pp. 7–10.
- [3] D. C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4] Z. Zhang, F. Profumo, and A. Tenconi, —*Axial flux machine for electric vehicles,*” *Elec. Mach. Power Syst.*, vol. 24, pp. 883–896, 1996.
- [5] Yilmaz, Kurtuluş. *Comparison Of Axial Flux And Radial Flux Brushless Dc Motor Topologies For Control Moment Gyroscope Wheel Applications*. Middle East Technical University. 2009
- [6] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Second Edition. Springer. 2008
- [7] T.J. Woolmer, M.D. McCulloch, —*Analysis of The Yokeless and Segmented Armature Machine*”. Oxford University. 2007
- [8] Lixin Situ, —*Electric Vehicle Development: The Past, Present & Future*”. Hong Kong Automotive Parts and Accessory System R&D Centre 78 Tat Chee Ave. 2009
- [9] Merve Yildirim, Mehmet Polat, Hasan Kürüm, —*A Survey on Comparison of Electric Motor Types and Drives Used for Electric Vehicles*”. Fırat University. 2014
- [10] <http://www.nmbtc.com/> diakses pada Desember 2014

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Gede Bayu Anugrah Janardana, lahir di Samarinda 15 Nopember 1993. Riwayat pendidikannya, menamatkan pendidikan dasar di SD N 1 Renon Denpasar (tahun 2005), pendidikan menengah di SMPN 6 Denpasar (tahun 2008), dan pendidikan tinggi di SMAN 4 Denpasar (tahun 2011). Saat ini telah menempuh kuliah di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama kuliah penulis aktif dalam beberapa kegiatan akademis maupun non akademis. Penulis merupakan asisten laboratorium di

Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Elektro. Penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro bidang Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa, serta aktif sebagai pembicara dalam kegiatan-kegiatan pelatihan bertemakan *soft skill*. Penulis juga aktif dalam kegiatan keilmiahan seperti penelitian, penulisan karya tulis dan lomba - lomba serta pelatihan bertema keilmiahan. Penulis banyak berkecimpung dalam penelitian-penelitian mengenai energi terbarukan, Teknologi tepat guna, mesin listrik dan juga mobil listrik. Penulis dapat dihubungi melalui email : **anugrah.janardana@gmail.com**

Halaman ini sengaja dikosongkan